

**О. Л. Сокольський  
В. І. Сівецький  
І. О. Мікульонок**

**ПРОЕКТУВАННЯ  
ФОРМУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ  
ОБЛАДНАННЯ  
ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТМАС**

**О. Л. Сокольський  
В. І. Сівецький  
І. О. Мікульонок**

# **ПРОЕКТУВАННЯ ФОРМУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТМАС**

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів,  
які навчаються за спеціальністю «Обладнання хімічних виробництв  
і підприємств будівельних матеріалів»*

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2014

УДК 66.03:678.5.029](075.8)  
ББК 35.11я73  
С59

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України  
(Лист № 1/11-6781 від 08.05.2014 р.)*

**Рецензенти:**

*І. І. Назаренко*, д-р техн. наук, проф.,  
Київський національний університет будівництва і архітектури

*О. М. Гавва*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний університет харчових технологій

**Відповідальний редактор**

*Є. М. Панов*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

**Сокольський О. Л.**

С59      Проектування формуючих пристроїв обладнання для переробки  
пластмас : навч. посіб. / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький,  
І. О. Мікульонок. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 148 с.: іл. – Бібліогр.:  
с. 142–144. – 300 прим.

**ISBN 978-966-622-000-0**

Розглянуто класифікацію, принципи дії, основні параметри й методики розрахунку формуючого обладнання. Наведено аналіз конструктивних особливостей формуючих пристроїв, їх взаємозв'язок з базовим обладнанням, технологічними режимами та властивостями перероблюваних матеріалів, базові методи параметричних, теплових розрахунків і розрахунків на міцність. Проведено огляд сучасних систем комп'ютерного моделювання процесів формування полімерних виробів.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів», а також спорідненими спеціальностями, зокрема спеціальністю «Хімічні технології переробки полімерних та композиційних матеріалів».

УДК 66.03:678.5.029](075.8)  
ББК 35.11я73

**ISBN 978-966-000-000-0**

© О. Л. Сокольський,  
В. І. Сівецький,  
І. О. Мікульонок, 2014

## ВСТУП

Натепер установився стійкий попит на вироби з полімерних матеріалів, який безперервно зростає. Одночасно підвищується складність полімерних виробів, вимоги до їхньої якості, точності розмірів, фізико-механічних показників тощо. Задоволення потреб у вітчизняних výroбах складної геометричної форми з пластмас неможливе без використання сучасних числових методів моделювання та оптимізації конструктивних і технологічних параметрів обладнання та устаткування процесів переробки полімерів і композицій з їх використанням. Остаточні параметри (форма, розміри, фізико-механічні властивості) продукція з полімерних і композиційних матеріалів набуває у формуючому інструменті, яким оснащується технологічне обладнання для підготовки перероблюваного матеріалу до формування.

Під час проектування формуючого устаткування потрібно враховувати, що його робочі канали можуть мати найрізноманітнішу геометрію, а перероблюваний матеріал у ньому – деформаційні і теплові режими. Усе це пов'язано зі зміною реологічних властивостей перероблюваного матеріалу на стадіях пластикації та формування.

Найбільш актуальними проблемами полімерного машинобудування є підвищення міцності й надійності відповідальних деталей і вузлів та забезпечення довговічності і продуктивності устаткування за мінімальних матеріало- та енергоємності. Необхідність підвищення технічного рівня, якості та конкурентоспроможності формуючих інструментів та оснастки потребує безперервного вдосконалення методів розрахунку й технології їх конструювання.

Конструктивні елементи формуючого устаткування перебувають у складному напружено-деформованому стані, який обумовлюється взаємодією з перероблюваними матеріалами в широкому діапазоні робочих тиску і температури у в'язкотекучому, твердому або пружноеластичному стані.

На сучасному етапі розвитку промисловості проектування конструктивних елементів формуючої оснастки для виготовлення виробів з полімерів і пластмас потребує моделювання процесів взаємодії тіл, що перебувають у різному фазовому стані, включаючи можливість фазових перетворень, та із врахуванням інших технологічних особливостей процесу перероблення.

Наявні аналітичні моделі процесів формування полімерних виробів дають змогу виконувати лише приблизний проектний розрахунок робочих каналів і порожнин формуючого устаткування й недостатньо враховують залежність реологічних параметрів перероблюваного матеріалу від локальних параметрів течії розплаву та певної форми каналів. Існуючі числові методи

дають змогу достатньо точно врахувати ці фактори, але мають той недолік, що проектний розрахунок здійснюють лише багаторазовим підбором геометричних параметрів з повним розрахунком на кожному кроці, що потребує значних обчислювальних ресурсів.

Тому актуальним є розроблення методів проектного розрахунку формуючого устаткування з використанням наближених аналітичних моделей з подальшим уточненням заданих параметрів числовими методами.

# ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ

## Основні позначення

$a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $c$  – масова теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $E$  – модуль пружності під час розтягу,  $\text{Па}$ ;  
 $K$  – сумарний коефіцієнт геометричної форми головки,  $\text{м}^3$ ;  
 $Q$  – коефіцієнт розрахункової усадки матеріалу;  
 $\Delta P$  – перепад тиску,  $\text{Па}$ ;  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ; коефіцієнт прямого потоку,  $\text{м}^3$ ;  
 $\beta$  – коефіцієнт зворотного потоку,  $\text{м}^3$ ;  
 $\gamma$  – коефіцієнт потоку витоків,  $\text{м}^3$ ;  
 $\Delta_{\text{зн}}$  – допуск на знос елементів форми (матриць і пуансонів),  $\text{мм}$ ;  
 $\Delta_{\text{м}}, \Delta_{\text{п}}$  – допуск на неточність виготовлення матриць і пуансонів,  $\text{мм}$ ;  
 $\delta_{\text{в}}, \delta_{\text{о}}$  – допуск на виготовлення розміру пластмасової деталі (вала або отвору),  $\text{мм}$ ;  
 $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  
 $\mu_{\text{ефi}}$  – ефективна в'язкість,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

## Основні скорочення

АБС – акрілонітрілбутадієнстирол;  
ГКС – гарячеканальна система;  
ГОСТ – міждержавний стандарт;  
ДСТУ – державний стандарт України;  
МСЕ – метод скінченних елементів.  
ПВХ – полівінілхлорид;  
ПЕ – поліетилен;  
ПЕНТ – поліетилен низького тиску;  
ПММА – поліметілметакрілат;  
ПП – поліпропілен;  
ПС – полістирол;  
САПР – система автоматизованого проектування;  
ТПА – термопластавтомат;  
ХКС – холодноканальна система;  
ЧВА – черв'ячно-валковий агрегат.

# **1. КЛАСИФІКАЦІЯ І МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ФОРМУЮЧОГО ІНСТРУМЕНТУ**

## **1.1. Загальні положення**

Формуючий інструмент за його технологічним призначенням можна поділити на:

- 1) форми для пресування;
- 2) форми для лиття під тиском;
- 3) екструзійні головки;
- 4) калібрувальний інструмент;
- 5) форми для роздувного формування;
- 6) форми для пневмовакуумного формування.

Для конструювання формуючого інструменту необхідно виконати дві умови:

– визначитися з конструкцією й матеріалом пластмасового виробу, а також планом його випуску;

– вибрати базове обладнання для виготовлення виробу.

Для конструювання формуючого інструменту потрібно одночасно враховувати такі фактори [5]:

- 1) термостатування, тобто забезпечення заданого температурного режиму;
- 2) гідродинаміки, тобто врахування реологічних властивостей полімеру;
- 3) міцності й жорсткості конструктивних елементів формуючого інструменту;
- 4) точності та взаємозамінності виробів і конструктивних елементів;
- 5) надійності й довговічності конструктивних елементів;
- 6) техніки безпеки під час роботи з формуючим устаткуванням;
- 7) патентної чистоти конструктивних рішень;
- 8) швидкості проектування формуючого устаткування;
- 9) оптимальності конструкції з точки зору технологічності виготовлення, підвищення довговічності, поліпшення технологічних параметрів, зменшення частки відходів і браку. Для досягнення цієї мети застосовують системи автоматизованого проектування (САПР).

Під час проектування каналів формуючих інструментів необхідно враховувати:

1) реологічні й теплофізичні властивості розплавів; потрібно прагнути до спрощення форми каналів, скорочення шляху розплаву й рівномірності його температурного поля;

2) умови експлуатації виробу; у відформованих полімерних виробах виникає анізотропія властивостей, у зв'язку з орієнтацією молекул і наповнювачів у напрямі течії матеріалу, що потрібно узгоджувати з напрямом навантажень на виріб під час експлуатації;

3) контури формуючих порожнин і каналів мають бути плавними, що знижує ймовірність виникнення дефектів;

4) площа рознімання форм має бути вибрана із умови максимальної легкості витягання виробу;

5) формоутворювальні елементи мають сприяти максимальній легкості витягання виробу із форми (ухили формувальні, радіуси литтєві);

6) можливість виникнення залишкових напружень, які можуть спричинити викривлення виробу. Вони розділяються на орієнтаційні, термічні, дифузійні, армування.

## 1.2. Основні чинники, що визначають технологічність виробів із пластмас

Основними чинниками, що визначають технологічність полімерних і пластмасових виробів та їх елементів, є такі:

1) Товщина стінок виробу має бути мінімально необхідною і за можливості однаковою (рис. 1.1), інакше може відбуватися нерівномірна усадка, що спричинює викривлення, тріщини і здуття виробу [2, 5].

Мінімальна товщина стінок визначається текучістю розплаву й потрібною міцністю виробу.

Для підсилення стінок і запобігання викривленню передбачають ребра жорсткості. Вони повинні мати ухили та радіуси закруглення (рис. 1.1, д).

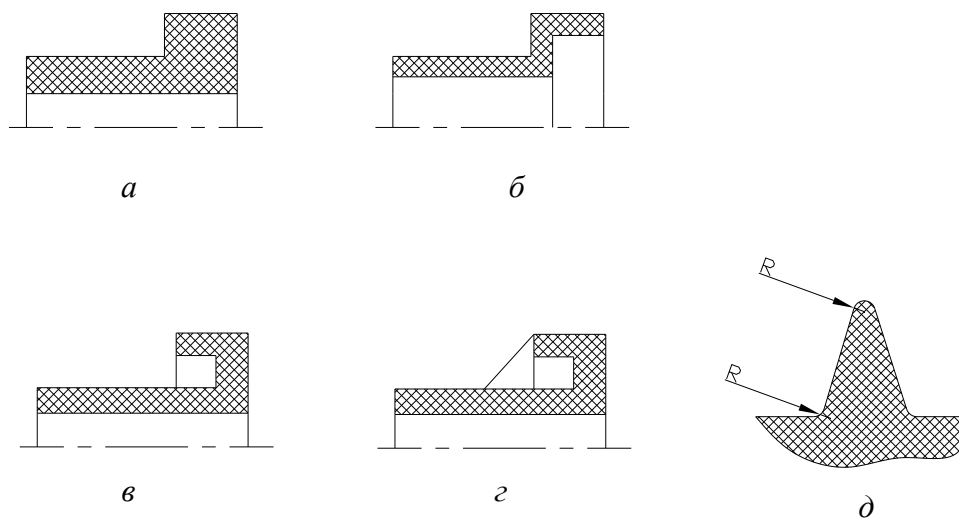


Рис. 1.1. Конструювання деталі: а – неправильно, б–г – правильно, д – переріз ребра жорсткості

2) Необхідно передбачати радіуси закруглення (за винятком площини рознімання форм).



3) Для полегшення витягання виробу з форми (за винятком окремих випадків) необхідно передбачати технологічні ухили.

4) Опорні поверхні для монтажу майбутніх деталей мають перешкоджати їх викривленню. Суцільні опорні поверхні замінюють буртиками та ніжками заввишки 0,3–0,5 мм, зазвичай забезпечуючи при цьому три точки опори.

5) Отвори й поглиблення доцільніше розташовувати перпендикулярно до площини рознімання форм.

## 2. КЛАСИФІКАЦІЯ, КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ І ПРИНЦИП ДІЇ ФОРМ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ

### 2.1. Загальні положення

Прес-форми мають забезпечувати: переведення прес-матеріалу у в'язкотекучий стан, деформацію прес-матеріалу й надання йому потрібних форми й розмірів, їх фіксацію і виштовхування з прес-форми виробів.

Прес-форми зазвичай працюють за температури 130–190 °С і тиску 15–200 МПа.

При цьому для прямого пресування прес-порошків застосовують тиск 15–50 МПа, для волокнитів 40–70 МПа, для литтєвого пресування 150–200 МПа.

### 2.2. Основна класифікація форм для пресування

Загальною технологічною особливістю процесу пресування є тісний взаємозв'язок виробу з формою. Розташування виробу, його складність, використання в конструкції металевої арматури, наявність піднутрень тощо впливають на характер розташування виробів у формі, кількість площин рознімання в ній і на вибір типу форми – для прямого пресування або литтєвого пресування (прес-лиття), з верхньою або нижньою завантажувальними камерами [1, 5], (рис. 2.1–2.3).

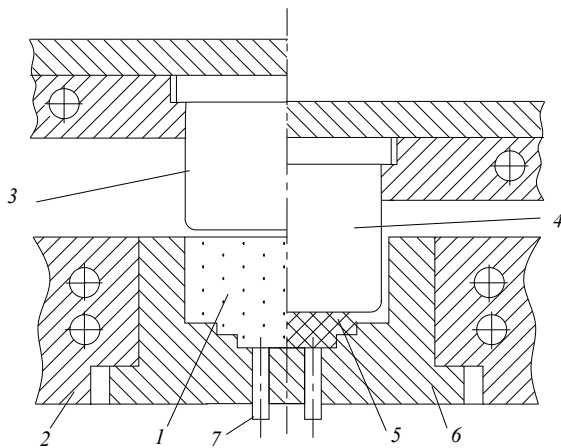


Рис. 2.1. Схема прямого пресування:  
1 – прес-матеріал; 2 – обійма матриці;  
3 – пуансон до пресування; 4 – пуансон при пресуванні; 5 – пресований виріб;  
6 – матриця; 7 – виштовхувачі

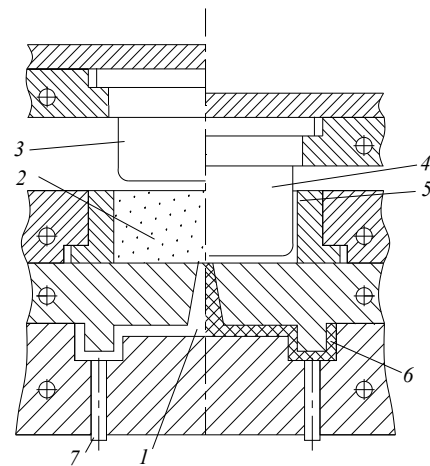
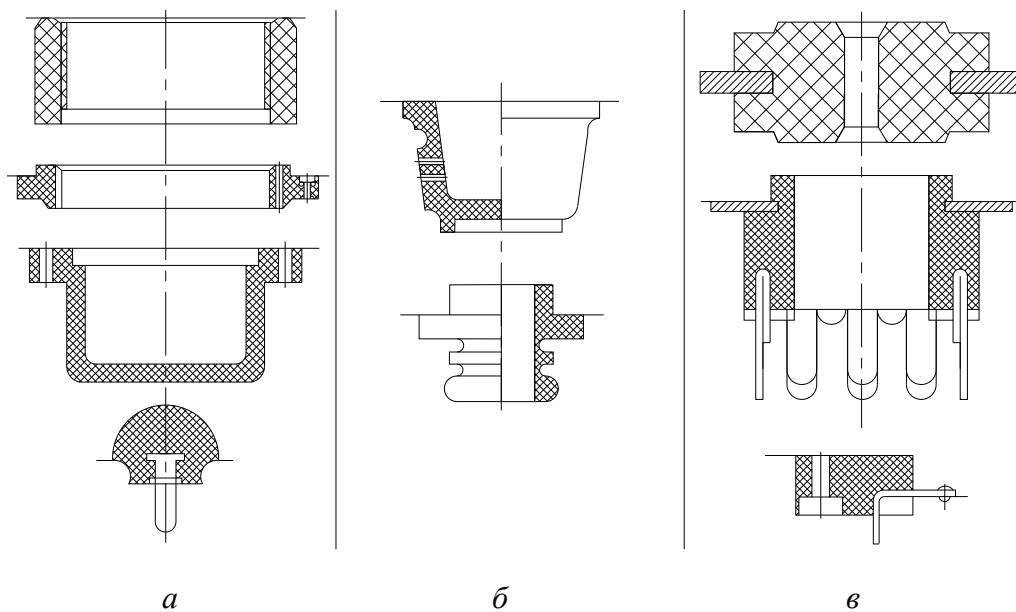


Рис. 2.2. Схема литтєвого пресування:  
1 – ливник; 2 – прес-матеріал;  
3, 4 – пуансон; 5 – завантажувальна камера;  
6 – пресований виріб; 7 – виштовхувачі



*Рис. 2.3.* Ескізи типових виробів, що отримуються в прес-формах:  
*a* – з однією горизонтальною площиною рознімання (пряме пресування);  
*б* – з одною горизонтальною і одною вертикальною площинами рознімання (пряме пресування); *в* – з однією горизонтальною площиною рознімання, складних, насичених металевою арматурою (прес-лиття)

Узагальнену класифікацію форм для пресування деталей з пластмас надано в табл. 2.1.

*Таблиця 2.1.* Класифікація форм для пресування деталей з пластмас

Класифікаційна ознака	Найменування й характеристика форми	Характеристика виробів
1. Наявність зв'язку з обладнанням	1.1. Знімні форми, що періодично знімаються в ході технологічного процесу для витягання деталі й завантаження матеріалів. 1.2. Стационарні форми. Постійно закріплені в ході технологічного процесу на обладнанні, що діє напівавтоматично або автоматично.	1.1. Деталі різної конфігурації із зниженими вимогами до точності і невеликою програмою випуску.  1.2. Деталі різної конфігурації і розмірів з підвищеними вимогами до точності.
2. Метод виготовлення	2.1. Форми для прямого пресування.  2.2. Форми для прес-лиття.	2.1. Деталі площинні, монолітні, мало армовані, рівностінні. Точність виготовлення не висока. 2.2. Деталі складної конфігурації. Високо армовані, різностінні. Точність висока

Класифікаційна ознака	Найменування й характеристика форми	Характеристика виробів
3. Кількість формуючих гнізд	3.1. Одногніздові. 3.2. Багатогніздові.	3.1. Деталі великих розмірів і складної конфігурації 3.2. Деталі, що виготовляються в масовому і крупносерійному виробництві.
4. Характер рознімання	4.1. З однією горизонтальною площиною рознімання, паралельною напрямку зусилля змикання. 4.2. З двома площинами. 4.3. З однією-двома або декількома вертикальними площинами, перпендикулярними напрямку зусилля змикання. 4.4. З комбінованим розніманням.	Різні вироби. Точність виготовлення їх розмірів, що перетинають площини рознімання, невисока.

Усі деталі, з яких складаються прес-форми, можна розділити на дві групи:

- 1) технологічного призначення (робочі або формуючі деталі), безпосередньо дотичні з пресованим матеріалом і такі, що беруть участь у формуванні;

- 2) конструктивного призначення. Здійснюють взаємну фіксацію деталей форми, обігрів, пересування, зв'язок із пресом і т.д.

До деталей технологічного призначення належать матриці, пуансони, деталі ливникової системи, вузла завантаження матеріалу, деталей виштовхувальної системи, деталей установки і пересування.

До деталей конструктивного призначення належать такі, що підтримують, обігрівають, слугують для монтажу (пуансонотримачі, обойми), опорні, напрямні, кріпильні.

Приклад конструктивного виконання типової стаціонарної прес-форми для прямого пресування показано на рис. 2.4.

У пресуванні беруть участь: пуансон 5, матриця 4, контактні виштовхувачі 14. Усі інші деталі забезпечують роботу прес-форми, яка встановлена на пресі постійно, стаціонарно, на весь час виконання заданої програми виробів.

Деталлями 2, 18, 19, 20 верхня та нижня полуформи закріплюються до плит пресу. Деталі 17, 21, 22, 23 і 24 скріплюють окремі вузли та деталі один за одним, а 9, 10 та 1 – центрують рухомі частини прес-форми. У деталях 3 і 6 здійснюється монтаж нагрівальних елементів, а у 8 і 11 – монтаж головних

формуючих деталей 4, 5, 14. Деталь 7 захищає нагрівальні елементи від пошкодження. Деталь 13 створює простір для розміщення блока виштовхувачів. Деталі 7 забезпечують контакт двох півформ при їх змиканні (це своєрідний компенсатор розмірного ланцюга, який визначає положення загальних формуючих деталей по вертикалі).

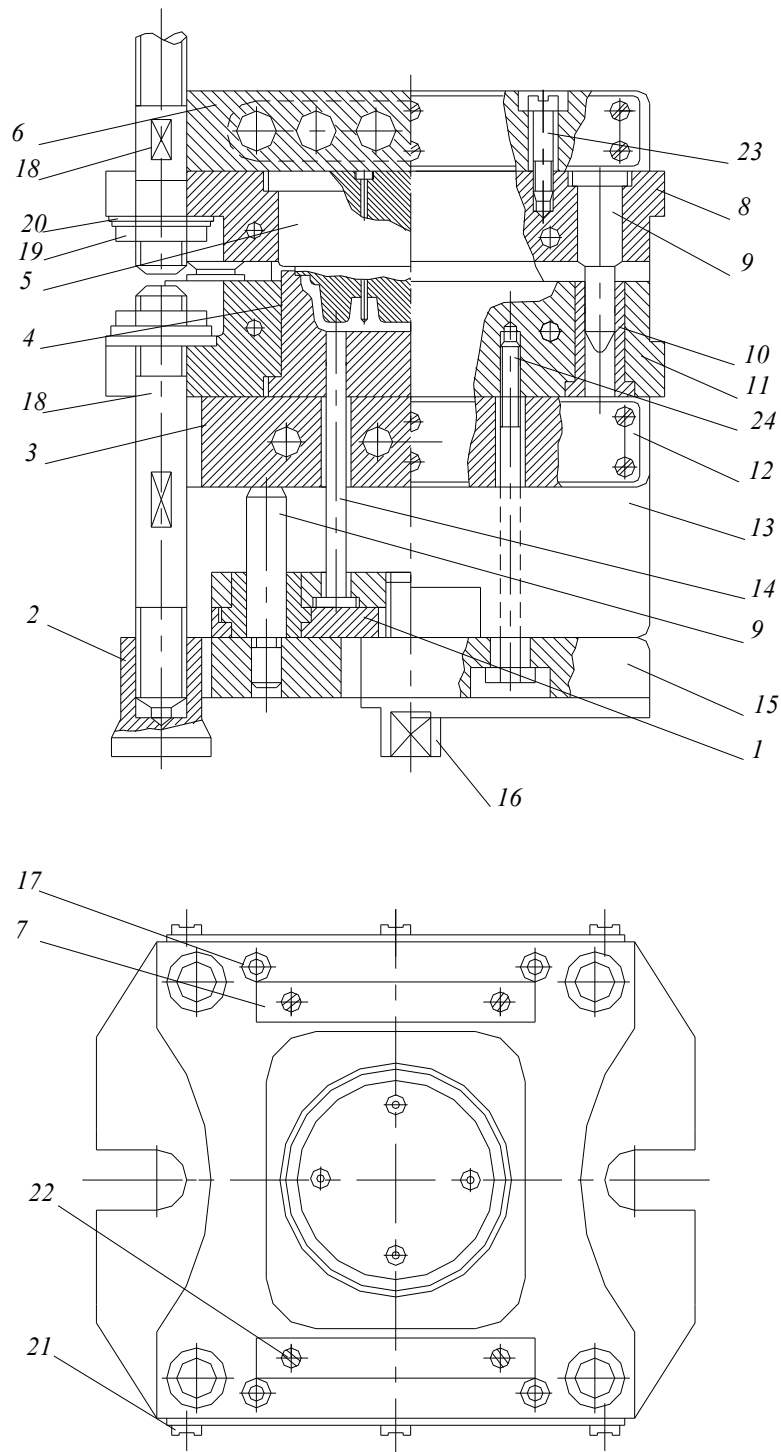


Рис. 2.4. Приклад конструкції стаціонарної прес-форми (без теплоізолювальних плит), позначення – в тексті

Деталі 1, 15 забезпечують монтаж блока виштовхувачів, деталь 16 поєднує блок виштовхувачів з нижнім виштовхувальним гідроциліндром пресу.

У розкритому стані прес-форма піднята, виштовхувачі 14 знаходяться у крайньому нижньому положенні. Порожнину прес-форми завантажують прес-матеріалами, а потім верхню півформу піднімають, пуансон 5 виходить з порожнини, а виріб у ній залишається. Потім через хвостовик 16 піднімають блок виштовхувачів до упору плити з плитою обігріву 3; при цьому виштовхувачі піднімають виріб, і видаляють його з робочої зони. Потім нижній плунжер з хвостовиком опускається, та переміщує блок виштовхувачів у його початкове положення.

### 3. КОНСТРУЮВАННЯ ФОРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ФОРМ

#### 3.1. Загальні положення

Майже всі деталі, які не контактують з полімерним матеріалом, нормалізовані або стандартизовані, але і до формуючих елементів висувається низка вимог.

**Матриці** – найбільш відповідальні деталі прес-форми, у яких вироби набувають необхідної форми та розмірів. В основному є поєднанням двох елементів: власне матриці і завантажувальної камери. Можуть бути суцільними і складеними. Зовнішня форма, як правило, прямокутна або кругла (рис. 3.1).

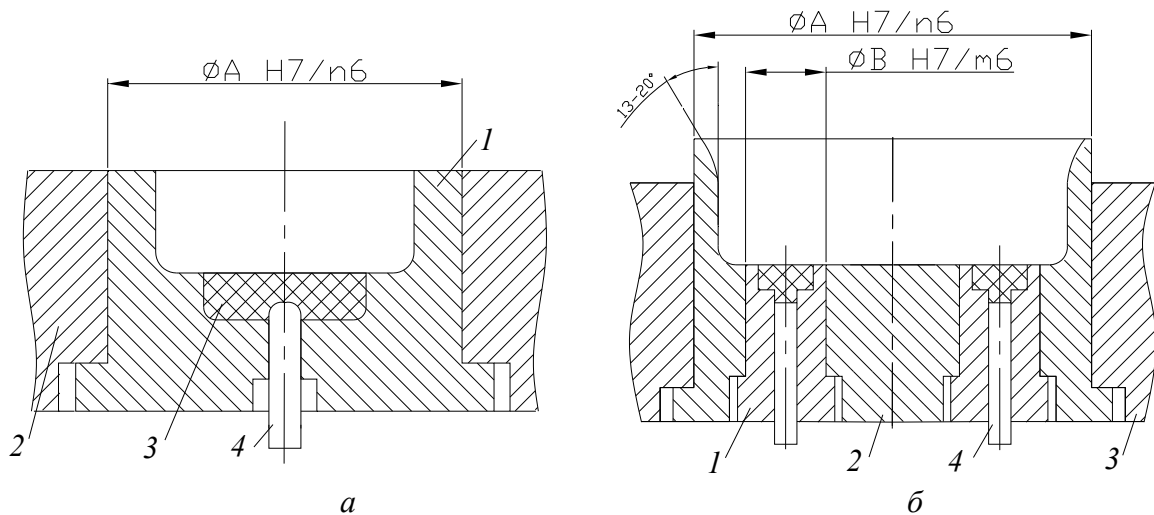


Рис. 3.1. Складені матриці: *а* – матриця з індивідуальною завантажувальною камерою як одне ціле (*1* – формуюча вставка, *2* – обойма, *3* – виріб, *4* – знак-виштовхувач);  
*б* – складена конструкція із формуючими вставками (*1* – формуюча вставка, *2* – завантажувальна камера, *3* – обойма, *4* – виштовхувач)

Для зменшення тертя завантажувальна камера повинна мати у верхній частині до половини її висоти ухил  $15-20^\circ$  на сторону.

Розміри завантажувальних камер в плані не повинні перевищувати розміри формуючої порожнини більш ніж на 10–12 мм, а площа пресування не повинна бути менше 60–65 % площі завантажувальної камери.

**Пуансони** застосовуються для передачі тиску на прес-матеріал і оформлення внутрішніх поверхонь деталей (рис. 3.2).

Пуансони бувають суцільні і складені.

Мінімальний зазор між матрицею і пуансоном має становити 0,02–0,03 мм на сторону.

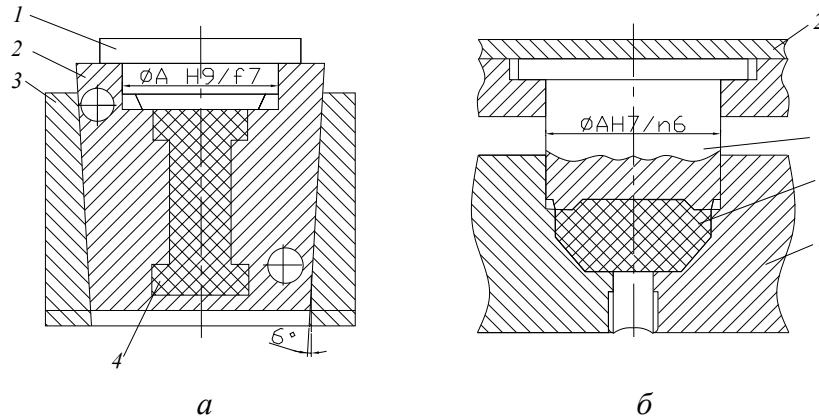


Рис. 3.2. Схеми пресування: *а* – з суцільним пуансоном і рознімною по вертикалі матрицею (1 – суцільний пуансон, 2 – рознімна матриця, 3 – обойма, 4 – пресований виріб);  
*б* – із складеним пуансоном (1 – пуансон, 2 – пуансонотримач, 3 – матриця, 4 – пресований виріб)

### 3.2. Розрахунок виконавчих розмірів формуючих елементів форм

Величина виконавчих розмірів формоутворювальних елементів приймається за формулами [1]:

– для виконавчого розміру матриці

$$P_m = \left( P_{в.сер} + P_{в.сер} Q_{сер} - \frac{\Delta_m}{2} \right)^{+\Delta_m}; \quad (3.1)$$

– для виконавчого розміру пуансона

$$P_{\pi} = \left( P_{о.сер} + P_{о.сер} Q_{сер} + \frac{\Delta_{\pi}}{2} \right)_{-\Delta_{\pi}}, \quad (3.2)$$

де  $P_{в.сер}$ ,  $P_{о.сер}$  – середній розмір пластмасової деталі – вала (зовнішньої поверхні) та отвору (внутрішньої поверхні), мм;  $Q$  – коефіцієнт розрахункової усадки матеріалу;  $\Delta_m$ ,  $\Delta_{\pi}$  – допуск на неточність виготовлення матриць і пуансонів, мм.

Індекси max, min, сер, при відповідних величинах тут і далі вказують на максимальне, мінімальне і середнє значення цих величин.

Якщо використовувати відомі співвідношення, що мають місце при граничному призначенні допусків на розміри деталей:

$$P_{в.сер} = P_v - \frac{\delta_v}{2}; \quad P_{о.сер} = P_o + \frac{\delta_o}{2};$$

$$Q_{сер} = Q_{max} - \frac{\Delta Q}{2} = Q_{min} + \frac{\Delta Q}{2},$$

де  $\Delta Q = Q_{max} - Q_{min}$  – коливання величини коефіцієнту розрахункової усадки матеріалу;  $\delta_v$ ,  $\delta_o$  – допуск на виготовлення розміру пластмасової деталі – вала або отвору, мм.



Тоді формули (3.1) і (3.2) можуть бути перетворені так, щоб їх доданками були номінальні розміри пластмасових деталей і в них входили граничні значення коефіцієнтів усадки матеріалу.

З формули (3.1) отримуємо

$$P_{\text{м.мін}} = P_{\text{м}}; \quad P_{\text{м.макс}} = P_{\text{м}} + \Delta_{\text{м}},$$

а з формули (3.2)

$$P_{\text{п.макс}} = P_{\text{п}}; \quad P_{\text{п.мін}} = P_{\text{п}} - \Delta_{\text{п}}.$$

Розміри гранично зношених матриць і пуансонів, відповідно до прийнятих основними положень методики, виявляються рівними:

$$P_{\text{м.зн}} = P_{\text{м.макс}} + \frac{\Delta_{\text{зн}}}{2} = P_{\text{м}} + \frac{3\Delta_{\text{зн}}}{2};$$

$$P_{\text{п.зн}} = P_{\text{п.мін}} - \frac{\Delta_{\text{зн}}}{2} = P_{\text{п}} - \frac{3\Delta_{\text{зн}}}{2},$$

де  $\Delta_{\text{зн}}$  – допуск на знос елементів форми (матриць і пуансонів), мм. Зазвичай приймається рівним 0,01 мм.

Щоб виготовлення пластмасових деталей здійснювалося без розмірного браку, мають дотримуватися такі нерівності, розв'язання яких є перевіркою правильності розрахунку виконавчих розмірів форм:

– для пластмасової деталі – валу (нова матриця):

$$P_{\text{м.мін}} - P_{\text{в}}Q_{\text{макс}} > P_{\text{в.мін}};$$

$$P_{\text{м.макс}} - P_{\text{в}}Q_{\text{мін}} < P_{\text{в.макс}}.$$

– для пластмасової деталі – валу (зношена матриця)

$$P_{\text{м.мін}} - P_{\text{в}}Q_{\text{макс}} > P_{\text{в.мін}};$$

$$P_{\text{м.зн}} - P_{\text{в}}Q_{\text{мін}} \leq P_{\text{в.макс}}.$$

– для пластмасової деталі – отвору (новий пуансон)

$$P_{\text{п.мін}} - P_{\text{о}}Q_{\text{макс}} > P_{\text{о.мін}};$$

$$P_{\text{п.макс}} - P_{\text{о}}Q_{\text{мін}} < P_{\text{о.макс}}.$$

– для пластмасової деталі – отвору (зношений пуансон)

$$P_{\text{п.зн}} - P_{\text{о}}Q_{\text{макс}} \geq P_{\text{о.мін}};$$

$$P_{\text{п.макс}} - P_{\text{о}}Q_{\text{мін}} < P_{\text{о.макс}}.$$

Завдяки застосуванню даної схеми розрахунку поле розсіювання розмірів пластмасових деталей по заданому полю допуску розподіляється рівномірно і так, що центр групування розмірів в партії виготовлених деталей збігається з серединою поля допуску.

### 3.3. Формуючі знаки

Формуючі знаки утворюють у виробках гладкі отвори і симетричні вікна. Деталі форми, які утворюють заглиблення й отвори несиметричної конфігурації також називають вставками або вкладишами. Можуть застосовуватися також для формування різьбових частин (різьбові знаки і кільця). Знаки бувають рухомі й нерухомі. Знаки, що беруть участь у виштовхуванні, називають знак-виштовхувач. Висота посадочної частини отвору під знак має бути меншою від загальної висоти для полегшення посадки (рис. 3.3–3.5).

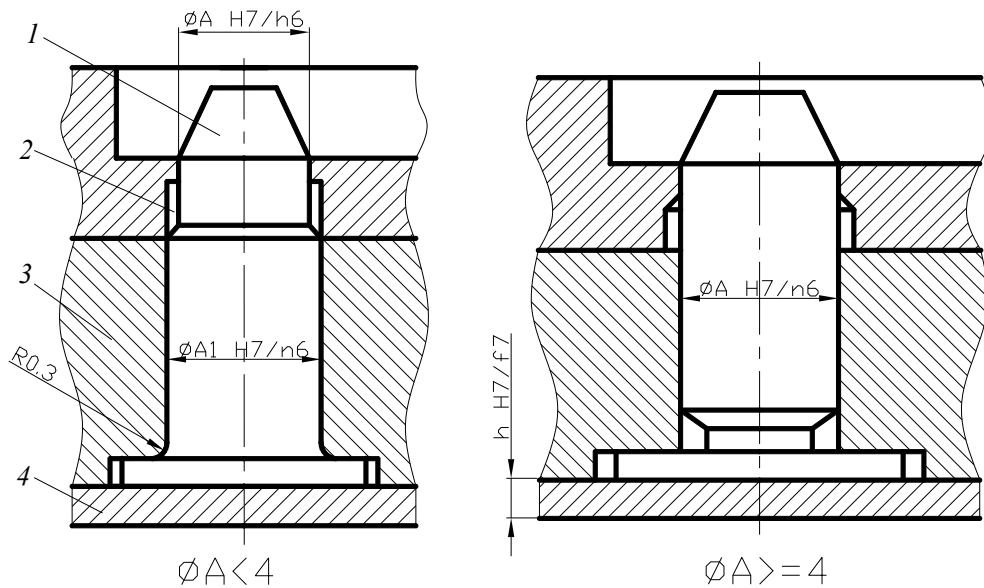


Рис. 3.3. Нижні знаки: 1 – знак, 2 – матриця, 3 – знакотримач, 4 – плита нижня

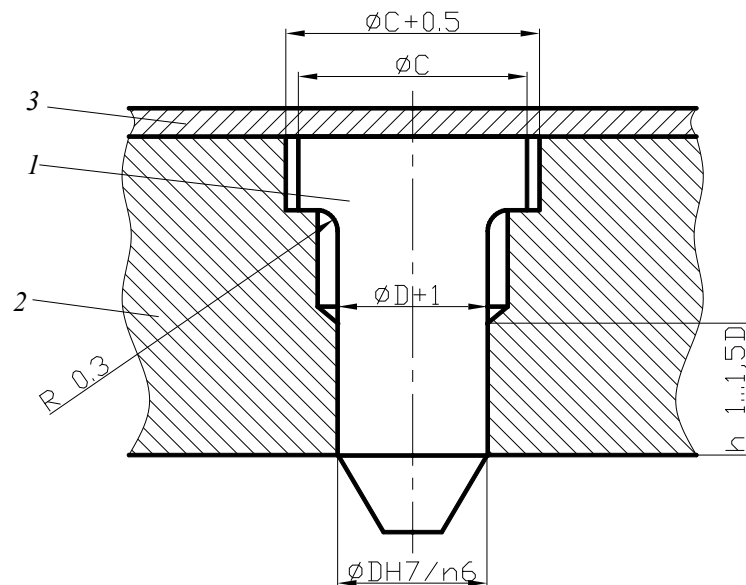


Рис. 3.4. Верхній знак: 1 – знак верхній, 2 – пуансон, 3 – плита верхня

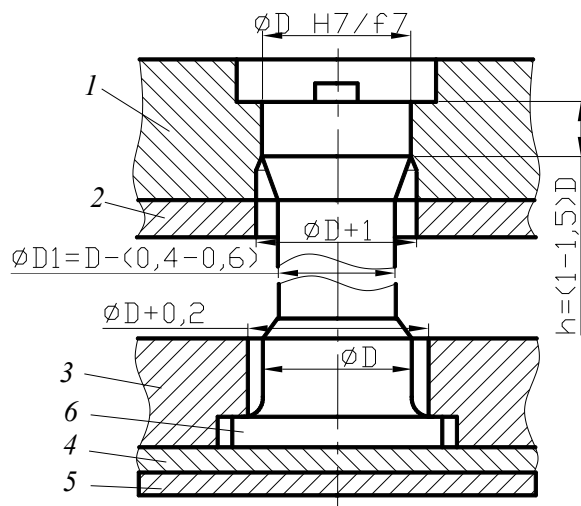


Рис. 3.5. Знак-виштовхувач: 1 – матриця, 2 – плита обігріву, 3 – плита виштовхувачів, 4 – прокладка, 5 – плита хвостовика, 6 – знак-виштовхувач

### 3.4. Різьбові знаки

Існує чотири види різьбових знаків:

- 1) знімні різьбові знаки, що викручуються вручну (рис. 3.6 і 3.7);
- 2) нерухомі знаки зі зливом виробів з різьби, як правило плитою (причому за рахунок пружних властивостей матеріалів різьба не ушкоджується);
- 3) цангові різьбові знаки, що складаються з рухомих сегментів, які роз'єднуються під час розкриття форми;
- 4) різьбові знаки, що викручуються механізовано (з власним приводом або з механічною передачею від системи виштовхування форми).

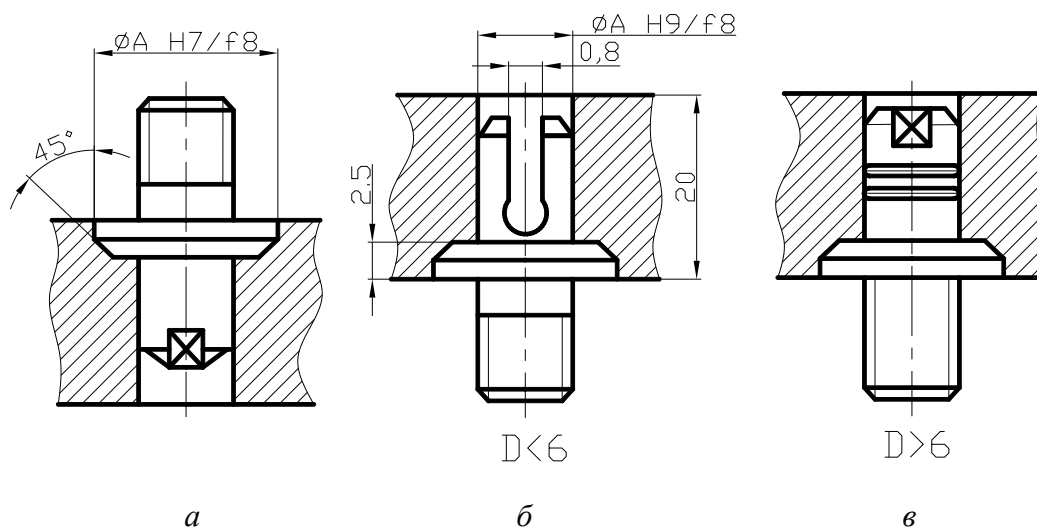


Рис. 3.6. Знімні різьбові знаки для формування внутрішньої різьби:  
а – нижній; б, в – верхні

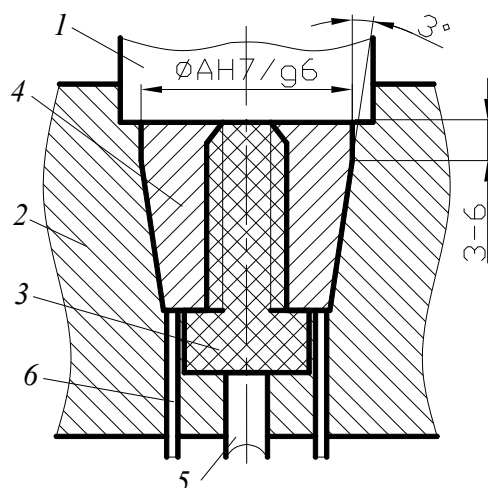


Рис. 3.7. Різбове кільце для формування зовнішньої різьби: 1 – пуансон, 2 – матриця, 3 – виріб з різьбою, 4 – різбове кільце, 5 – виштовхувач для виробів, 6 – виштовхувач для різбового кільця

Різбові знаки часто виконуються знімними, з буртиком для запобігання підтіканню прес-матеріалу в отвори під знаки, з конструктивно оформленим входом і виходом різьби. Знаки можуть бути і верхніми і нижніми. Кільця для формування зовнішньої різьби, як правило, встановлюються в нижній частині прес-форми. Верхні різбові знаки робляться з хвостовиком, що утримує їх в певному положенні відносно площини пуансона, наприклад цанговим або з розрізними кільцями (рис. 3.6).

Всі діаметри і товщина виштовхувачів і знаків нормалізовані.

Існують також інформаційні знаки, що слугують для вказівки номера гнізда, виду і призначення матеріалу, дати і т.д. (рис. 3.8).

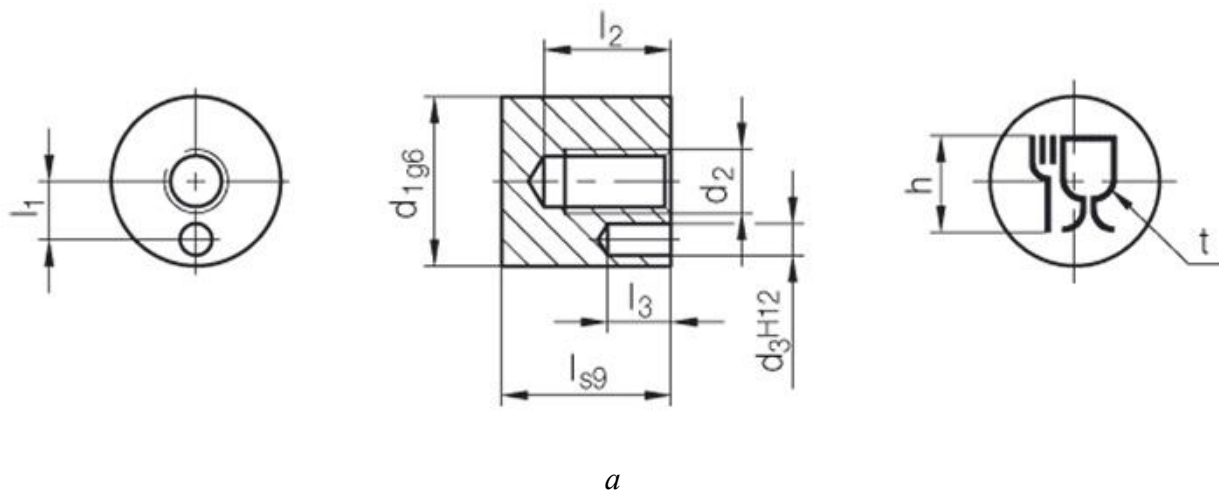
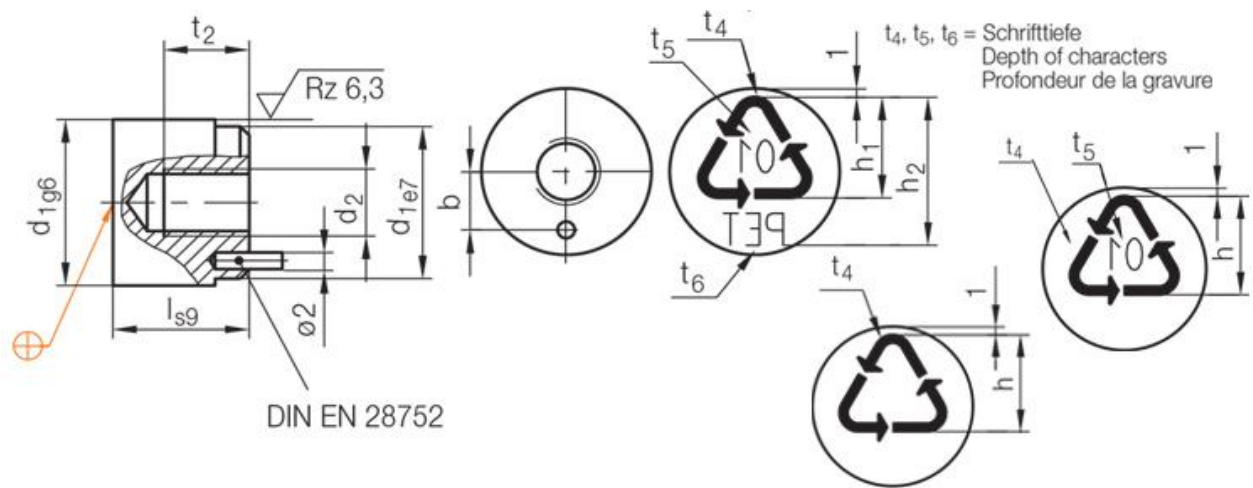
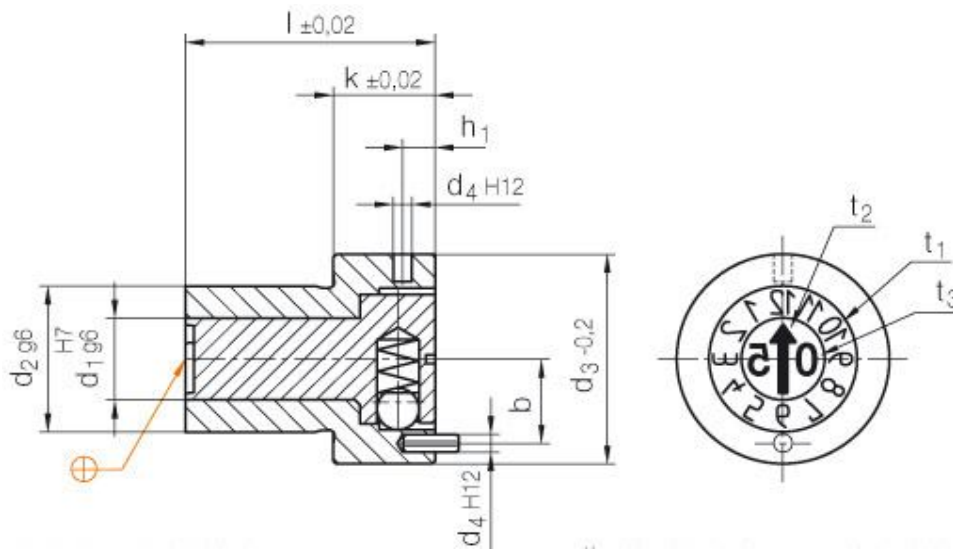


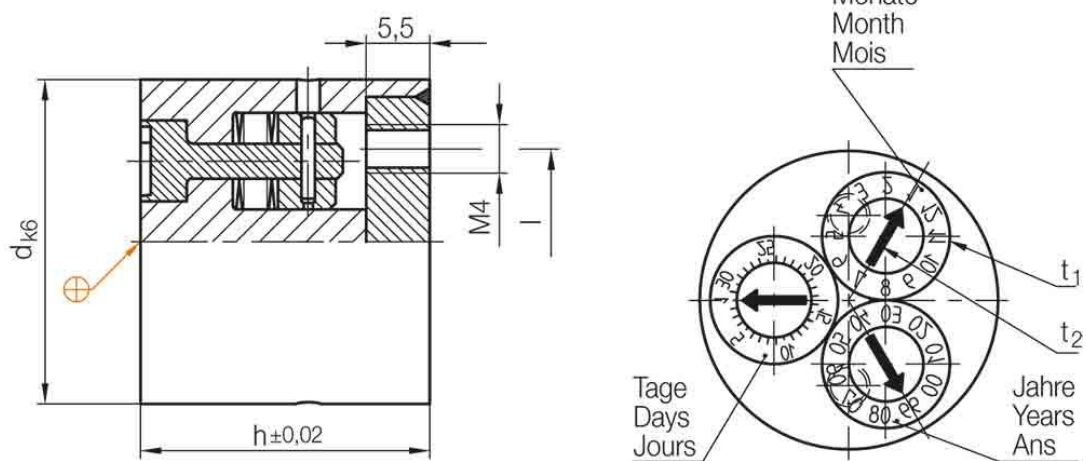
Рис. 3.8. Інформаційні знаки (фірма HASCO): а – харчове призначення; б – номер формуючого гнізда і тип полімеру; в – рік і місяць (з рухомою вставкою); г – повна дата (з трьома рухомими вставками)



6



6



2

Рис. 3.8: Закінчення. (Див. також с. 19)

### 3.5. Формуючі гнізда

За конструкцією формуючі гнізда поділяють на такі типи:

1) відкриті (формуюча порожнина є також і завантажувальною камерою, рис. 3.9,а);

2) закриті або поршневі (формуюча порожнина є продовженням завантажувальної камери, а в плані їх розміри збігаються, рис. 3.9,б).

3) напівзакриті, або з перетіканням (у них є спеціальна крайка на стику пуансона і матриці із напрямом облою вгору, рис. 3.9,в).

Вертикальний облой легше обробляти. Для видалення газів передбачають не менш трьох лисок на поверхні пуансона або різницю радіусів закруглення пуансона і матриці.

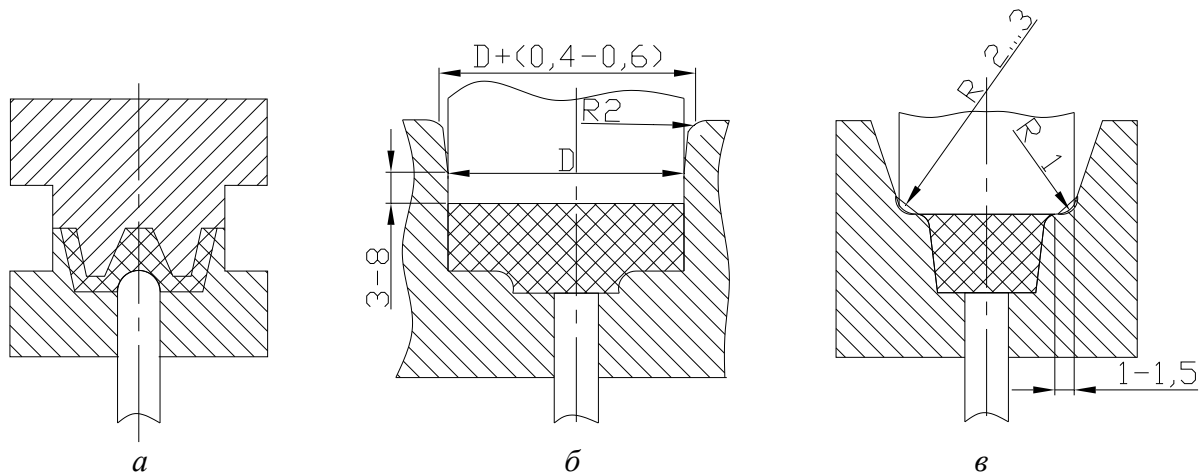


Рис. 3.9. Види завантажувальних камер: а – відкрита, б – закрити, в – напівзакрита

Об'єм завантажувальної камери має вміщати потрібну кількість прес-матеріалу і залишити 8–10 мм висоти для направлення пуансона.

Призначення конструктивних типів завантажувальних камер:

– відкриті – для виробів невеликої товщини, простих конфігурацій, невисокої точності;

– напівзакриті – для порошкоподібних або волокнистих прес-матеріалів, виробів різної конфігурації підвищеної точності;

– закриті – для виробів із пластмас малої текучості, високій точності виготовлення;

– закриті із зустрічними пуансонами – для виробів високої точності, складної конфігурації із шаруватих і волокнистих прес-матеріалів малої текучості.

### 3.6. Розрахунок висоти порожнини завантажувальної камери

Діаметральні розміри порожнин завантажувальних камер в плані є конструктивним елементом і задаються конструктором залежно від конфігурації та кількості формуючих порожнин (у прес-формах із спільною завантажувальною камерою). Тому збільшення об'єму порожнини завантажувальної камери здійснюється лише за рахунок збільшення її висоти. У свою чергу, висота порожнини завантажувальної камери залежить від таких чинників: конструктивних ознак прес-форми (закрита або напівзакрита); кількості формуючих порожнин (для напівзакритих прес-форм із спільною завантажувальною камерою); питомого об'єму прес-матеріалу; стану завантажуваного прес-матеріалу (нетаблетований, таблетований); об'єму формуючої порожнини, що бере участь в розміщенні прес-матеріалу (нетаблетованого, таблетованого); коефіцієнта заповнення порожнини камери (для таблеток).

У прес-формах закритого і напівзакритого типів глибина порожнини завантажувальної камери визначається висотою деталі. У прес-формах закритого типу вона визначається також глибиною занурення пуансона.

Об'єм порошкоподібного прес-матеріалу в мм<sup>3</sup> на одну деталь визначається за формулою

$$V = Gv_n,$$

де  $G$  – вага пресованої деталі з урахуванням облою, г;  $v_n$  – питомий об'єм прес-матеріалу, мм<sup>3</sup>/г.

Після визначення об'єму завантажуваного прес-матеріалу проводиться розрахунок висоти порожнини завантажувальної камери.

Для нетаблетованих матеріалів розрахунок висоти камери проводиться за такими формулами [1]. Для варіанту конструкції, коли горизонтальна проекція пресованої деталі є продовженням завантажувальної камери

$$H = \frac{V}{F} + (5...10),$$

де  $H$  – висота формуючого гнізда, мм;  $V$  і  $F$  – об'єм завантажуваного матеріалу (мм<sup>3</sup>) і площа горизонтальної проекції пресованої деталі (мм<sup>2</sup>), відповідно.

Для варіанту конструкції, коли горизонтальна проекція пресованої деталі менше проекції завантажувальної камери

$$H_1 = \frac{V - V_H}{F'} + (5...10),$$

де  $H_1$  – висота завантажувальної камери, мм;  $V_H$  – об'єм деталі, мм<sup>3</sup>;  $F'$  – площа завантажувальної камери, мм<sup>2</sup>.

### 3.7. Розрахунок зусиль пресування та знімання

Зусилля пресування (Н) становить

$$P = Fp_0,$$

де  $F$  – загальна площа пресування (проекція площі формуючої порожнини прес-форми на площину рознімання),  $\text{м}^2$ ;  $p_0$  – питомий тиск пресування (залежить від марки прес-матеріалу, ступеню складності деталі, способу пресування), Па.

У багатьох випадках величину  $F$  доцільно замінити добутком площі перетину завантажувальної порожнини прес-форми  $F_{\text{зп}}$  на кількість таких завантажувальних порожнин  $n$ , тоді можна записати

$$P = F_{\text{зп}}p_0nK,$$

де  $K$  – коефіцієнт, що враховує втрати тиску на тертя в ущільнювачах і інших пристроях (в основному беруть  $K = 1,2$ ).

Отже, величина  $P$  необхідна не лише для визначення потрібної потужності обладнання, але і для розрахунку кількості завантажувальних порожнин або гнізд.

Приблизне зусилля знімання деталі визначається за формулою

$$P_c \approx SN_n,$$

де  $S$  – сума площ усіх бічних поверхонь деталі, дотичних із металевою поверхнею форми,  $\text{м}^2$ ;  $N_n$  – питома сила зчеплення пластмаси з металом, Н.

Так, зазначене зусилля для прес-матеріалу АГ-4 приблизно дорівнює  $15 \cdot 10^5$  Па; а для матеріалу К-18 –  $(2-5) \cdot 10^5$  Па.



## 4. СИСТЕМИ ВИШТОВХУВАННЯ ВИРОБІВ, БОКОВОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗНАКІВ І КРІПЛЕННЯ ФОРМИ

### 4.1. Загальні положення

Вибір виштовхувальної системи для дістання деталей з форми здебільшого залежить від конфігурації й габаритів пресованої деталі. Відомі такі конструктивні варіанти виштовхувальних систем: стрижньові, клинові, комбіновані (для дістання деталей складної конфігурації зі стаціонарних прес-форм).

Проектування виштовхувальної системи треба починати з вибору способу виштовхування (рис. 4.1 і 4.2).

Найчастіше застосовують такі види виштовхувачів:

- стрижньові виштовхувачі (рис. 4.3,а);
- плоскі виштовхувачі (рис. 4.3,б);
- трубчасті виштовхувачі;
- виштовхувальні плити.

У прес-формах стаціонарного типу виштовхувачі кріпляться в спеціальних плитах, які через хвостовик отримують рух від виштовхувальної системи преса.

У знімних прес-формах функції виштовхувачів можуть виконувати знаки або спеціальні штовхачі, які встановлюються вручну і не мають постійного зв'язку з формою.

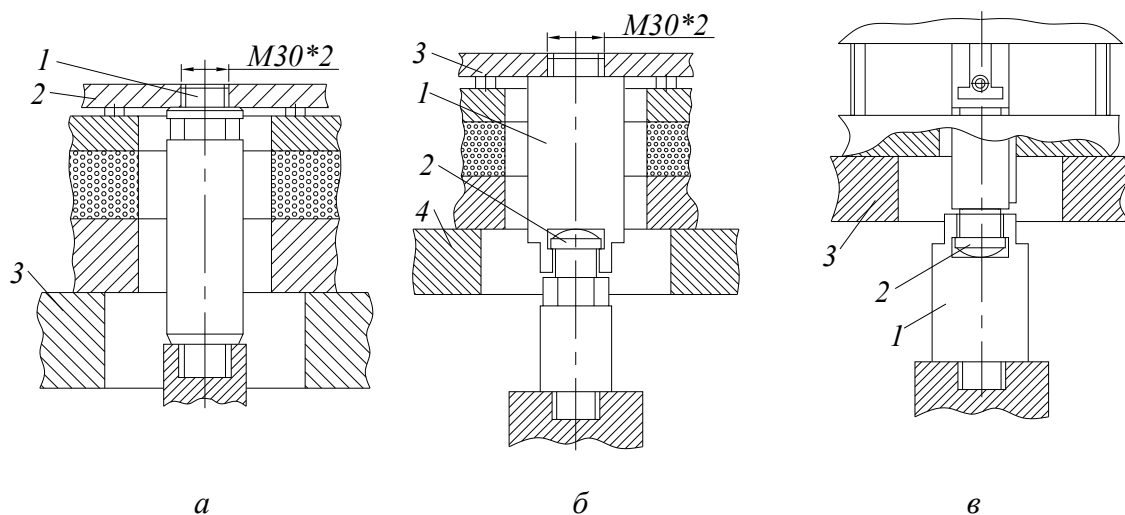


Рис. 4.1. Варіанти зв'язку виштовхувальних систем гідравлічного преса і прес-форми:  
а – суцільний хвостовик (1 – хвостовик згідно з ГОСТ 22559–77, 2 – плита виштовхувального пристрою прес-форми, 3 – стіл преса); б – складений хвостовик (1 – наконечник згідно з ГОСТ 22561–77, 2 – штовхач згідно з ГОСТ 22560–77, 3 – плита виштовхувального пристрою прес-форми, 4 – стіл преса); в – наконечник в блоці змінних прес-форм прямого пресування (1 – наконечник згідно з ГОСТ 22561–77, 2 – хвостовик згідно з ГОСТ 22559–77, 3 – стіл преса)

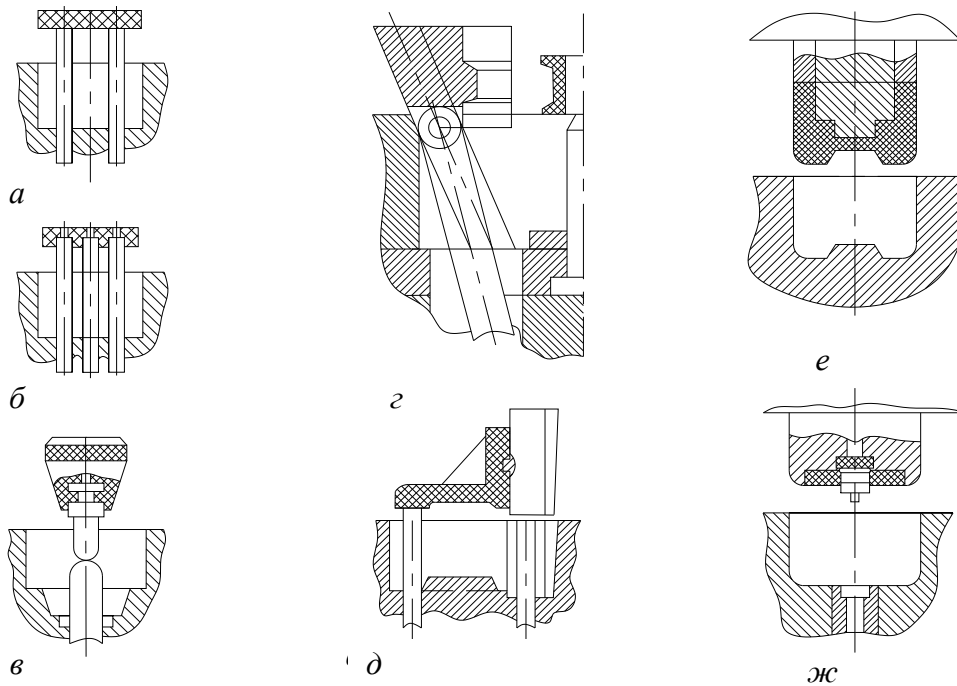


Рис. 4.2. Способи виштовхування пресованих виробів: *а* – стрижнем з гладким торцем; *б* – рухомим формуючим знаком; *в* – виштовхувачем крізь арматуру; *г* – за допомогою клинових щік; *д* – за допомогою щоки і стрижньових виштовхувачів; *е* – за допомогою гільзи; *ж* – за допомогою центрального стрижня

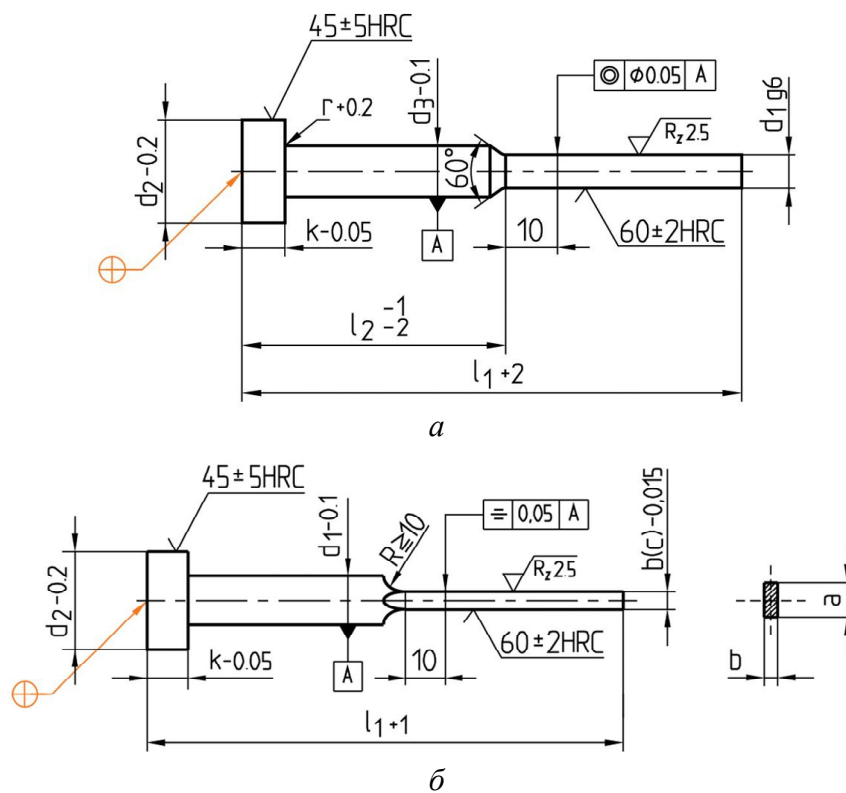


Рис. 4.3. Приклади конструктивного виконання виштовхувачів фірми HASCO: *а* – стрижньовий; *б* – плоский

До виштовхувачів ставлять такі вимоги:

- виштовхувачі потрібно ставити під арматуру в виробках, а також на їх потовщенні, глибші місця або місця, ближчі до країв (щоб уникнути деформацій і перекосів);
- відбитки від виштовхувачів не повинні псувати зовнішній вигляд виробу, тому їх торці мають розташовуватися в одній площині з дном формуючої порожнини або бути на 0,15–0,2 мм вище від неї. Виступи на виробі неприпустимі;
- висота торців виштовхувачів має бути однаковою (для уникнення перекосу);
- величина ходу має дорівнювати відстані від дна формуючої порожнини до верхньої площини завантажувальної камери плюс 5–6 мм;
- кріплення виштовхувачів в стаціонарних прес-формах рекомендується робити вільним (плаваючим); таке кріплення компенсує певне неспівпадання отворів у матриці і плитах виштовхувачів.

## 4.2. Розрахунок виштовхувача на стійкість

Момент інерції небезпечного перерізу становить

$$I = \frac{\pi \cdot d_1^4}{64}.$$

Критичне зусилля для стійкості

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EI}{(k l_n)^2}$$

де  $k$  – коефіцієнт закладення; для випадку, коли один кінець стрижня затиснений, а другий має подовжню рухливість,  $k = 0,7$ .

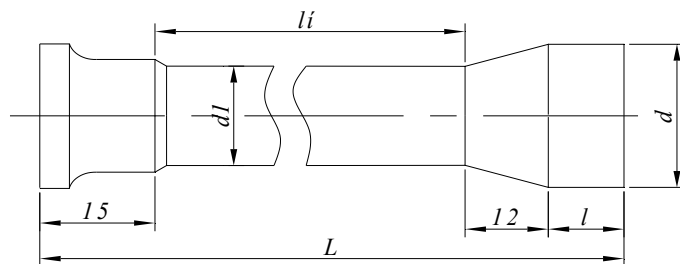


Рис. 4.4. Конструктивна схема виштовхувача [4]

Площа небезпечного перетину

$$F = \frac{\pi d_1^2}{4}.$$

Допустиме зусилля для стискування

$$[P] = F[\sigma],$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження на стискування, МПа.

Умова стійкості виконується, якщо  $[P] < P_{кр}$ .

Виштовхувач працездатний, якщо діючі на нього зусилля пресування і виштовхування не перевищують допустимих.

### 4.3. Конструктивне виконання систем бокового переміщення деталей форми

Система бокового переміщення знаків призначена для формування отворів і поглиблень під кутом до осі пресування.

Механізми переміщення знаків можуть бути: клинові (рис. 4.5), шарнірні, важільні, шестеренчасті й гідравлічні. Вибір визначається конфігурацією, розміром виробу, місцем розташування й надійністю роботи.

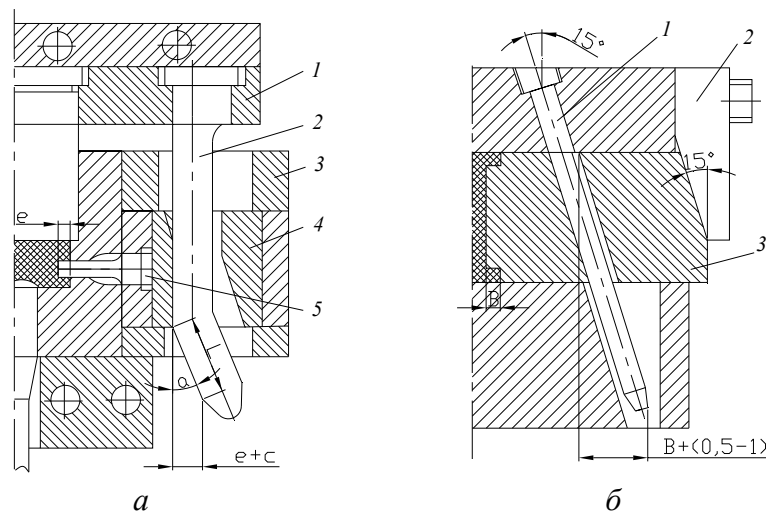


Рис. 4.5. Варіанти конструкції з переміщенням бокового знаку: *а* – з клином (1 – пуансонотримач, 2 – клин, 3 – скоба напрямної, 4 – шибер, 5 – боковий знак); *б* – з лекальною колонкою (1 – лекальна колонка, 2 – замковий планка, 3 – повзун)

Певні технологічні труднощі виникають під час формування виробів з декількома кільцевими виступами, із зовнішньою або внутрішньою різьбою тощо. Один з варіантів форм, що дають змогу вирішити це завдання, наведено на рис. 4.6.

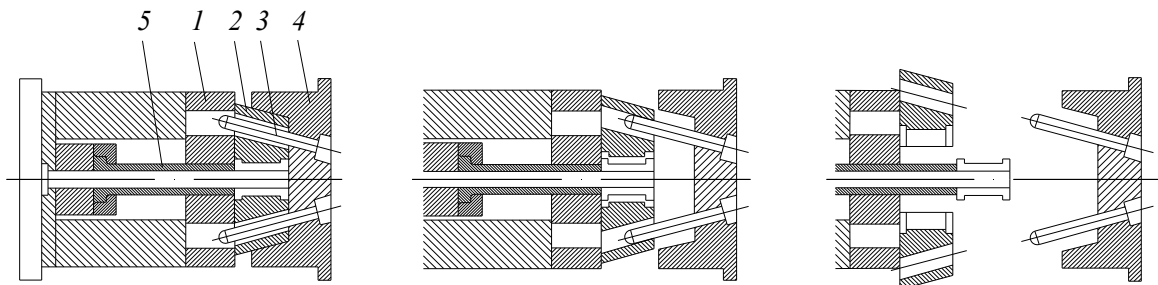


Рис. 4.6. Схеми дії форми з рознімною матрицею [11]

Особливість цього типу форм полягає в тому, що матриця 2, по-перше, рознімна, а по-друге, може переміщатися в радіальному напрямі по напрямних, виконаних на пуансонній частині форми 1. Для радіального розкриття матриці слугують колонки 3, розташовані під кутом у корпусі 4 матриці. У початковому положенні форма зімкнута. Під час відходу блоку 1 вліво рознімна матриця, ковзаючи по колонках 3, розкривається в радіальному напрямі. За подальшого руху пуансона виріб переміщується штовхачем 5 для подальшого скидання.

**Установка і закріплення прес-форм** проводиться з урахуванням розмірів і розташування пазів кріплення на базовому обладнанні (ГОСТ 16114–80, рис. 4.7).

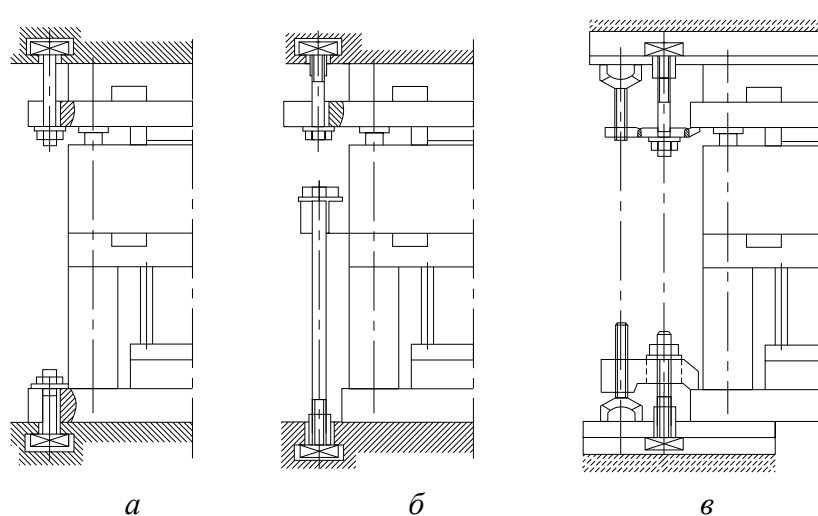


Рис. 4.7. Варіанти конструкцій закріплення стаціонарних прес-форм:

*а* – вушко в основі форми і в пуансонотримачі; *б* – вушко в обоймі і в пуансонотримачі; *в* – прихвати з регульовальними опорами (1 – болт, 2 – різьбове гніздо, 3 – прихоплювач, 4 – регульована опора)

**Системи центрування** призначені для точного сполучення двох півформ і спрямування руху пуансона під час його заходу в матрицю, а також для спрямування руху виштовхувальної системи. У систему центрування входять напрямні колонки і втулки – деталі конструктивного призначення, за допомогою яких здійснюється взаємодія частин прес-форми (рис. 4.8). Довжину колонок потрібно визначати конструктивно, керуючись довжиною пуансона (з припуском 5–10 мм) або величиною необхідного ходу виштовхування, товщиною плит і упору. Направні колонки півформ зазвичай встановлюють у рухомій (верхній) півформі [3, 4, 6].

Розміри напрямних втулок до колонок залежать від останніх. Висота втулки має лежати від півтора до двох величин її внутрішнього діаметра.

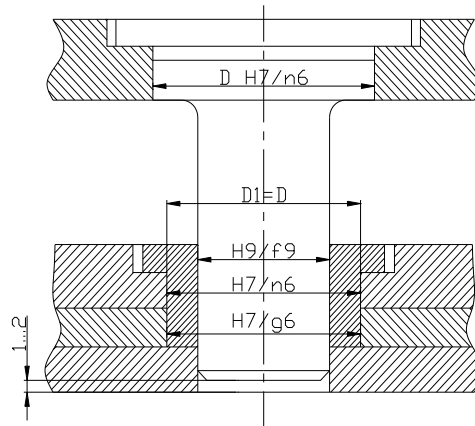


Рис. 4.8. Система центрування

Колонки виконують згідно з ГОСТ 22072–76, а втулки – ГОСТ 22075–76. У знімних формах зазвичай установлюють дві колонки різного діаметра для виключення можливості неправильного складання.

Для збільшення терміну служби системи центрування втулка може виконуватись перфорованою, а в отвори вставлятися сталеві кульки (рис. 4.9), що забезпечує заміну тертя ковзання більш ефективним тертям кочення.

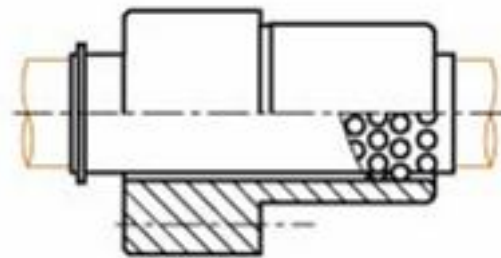


Рис. 4.9. Система центрування з кульковою втулкою

Особливу увагу під час конструювання форм потрібно приділяти вибору матеріалу для виготовлення деталей різного призначення. Для забезпечення потрібних експлуатаційних вимог матеріали матриць і пуансонів прес-форм мають характеризуватися достатньою в'язкістю, корозійною стійкістю, зносостійкістю, а також теплостійкістю. Одночасно з цим матеріали повинні мати хорошу оброблюваність і малу деформацію в процесі термічної обробки.

## 5. СИСТЕМИ ОБІГРІВУ ПРЕС-ФОРМ

### 5.1. Загальні положення

Призначення системи обігріву – створення максимально рівномірного заданого температурного поля у всьому об'ємі пресованого виробу, а також забезпечення умов для мінімальної витрати часу на нагрів і затвердіння.

Найбільш поширені натепер електричні системи обігріву. За типом джерел їх поділяють на елементи опору та індукційні. За характером установки – на зовнішні (у вигляді кожухів, хомутів) і внутрішні (у вигляді спіралі з ламелями або заповнені ізоляційним матеріалом, а також у вигляді плоского або трубчастого нагрівального елементу).

Трубчасті нагрівники стандартизовані (ГОСТ 13268–83). За діаметра 16 мм вони мають потужність 0,32–1,6 кВт.

Сумарна потужність нагрівників має дещо перевищувати розрахункову, але не більше ніж у 1,3 рази.

Індукційні нагрівники представляють собою мідну або латунну трубчасту спіраль, крізь яку пропускають високочастотний електричний струм, а всередині трубки проходить охолодна рідина для запобігання розплавленню трубки. Індукційні нагрівники менш інерційні й довговічні, ніж нагрівники опору, але складніші у виготовленні, монтажі й ремонті.

Метою теплового розрахунку прес-форми є визначення потужності нагрівників за двох режимів:

- у пусковому режимі в період розігрівання;
- у стаціонарному режимі роботи.

Потужність нагрівників беруть рівною більшому значенню з цих двох величин. Зазвичай потужність у пусковому режимі більша, але буває і інакше, в основному в разі розвиненої поверхні і малої маси форми, тому розрахунок обов'язково виконують для обох режимів.

### 5.2. Розрахунок потужності нагрівників у пусковому режимі роботи форми

Потужність, що споживається впродовж заданого часу розігрівання (він зазвичай становить 30–45 хв) [5]

$$W = \frac{Q_{\text{пр}}}{\tau} + Q_{\text{п}}^{\text{р}},$$

де  $Q_{\text{пр}}$  – теплота для розігрівання до температури пресування без урахування втрат, Дж;  
 $\tau$  – час розігрівання, с;  $Q_{\text{п}}^{\text{р}}$  – втрати теплоти за час розігрівання, Вт.

При цьому теплота  $Q_{\text{пр}}$  становить

$$Q_{\text{пр}} = cG_{\text{пр}}(T_{\text{сер}} - T_0),$$

де  $c$  – масова теплоємність сталі Дж/(кг·К), (для попередніх розрахунків можна брати  $c = 500$  Дж/(кг·К));  $G_{\text{пр}}$  – маса прес-форми, кг;  $T_{\text{сер}}$  – середня температура прес-форми за час розігрівання від початкової температури  $T_0 = 20$  °С до робочої температури  $T_p$ , °С.

Втрати теплоти за час розігрівання

$$Q_p = Q_{\text{бп}} + Q_{\text{сп}},$$

де  $Q_{\text{бп}}$  – втрати тепла бічними поверхнями, Вт:

$$Q_{\text{бп}} = \frac{\alpha_s f_6 (T_6 - T_0)}{2}.$$

Зазвичай значення коефіцієнта тепловіддачі від стінки беруть рівним  $\alpha_s = 0,15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), температуру нетеплоізованої стінки –  $T_6 = 165\text{--}170$  °С, а теплоізованої –  $T_6 = 80\text{--}85$  °С.

Втрати теплоти в стіл преса

$$Q_{\text{сп}} = f_k \frac{\lambda_{\text{пр}}}{\delta_{\text{пр}}} (T_{\text{срс}} - T_{\text{п}}),$$

де  $f_k$  – площа поверхні контакту прес-форми із пресом, м<sup>2</sup>;  $\lambda_{\text{пр}}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу прокладки, Вт/(м·К) (наприклад, для азбесту  $\lambda_{\text{пр}} = 0,2$  Вт/(м·К));  $\delta_{\text{пр}}$  – товщина прокладки, м (зазвичай  $\delta_{\text{пр}} = 3\text{--}6$  мм);  $T_{\text{срс}}$  – середня температура стінки за час розігрівання, °С;  $T_{\text{п}}$  – середня температура поверхні контакту (зазвичай  $T_{\text{п}} = 28\text{--}30$  °С).

### 5.3. Розрахунок потужності нагрівників у стаціонарному режимі роботи форми

Споживана потужність нагрівників визначається за залежністю (Вт)

$$Q_n = Q_k + Q_{\text{сп}} + Q_{\text{ос}} + Q_{\text{бс}} + Q_i,$$

де  $Q_k$  – корисна теплота, що витрачається на нагрівання прес-матеріалу, Вт;  $Q_{\text{сп}}$  – втрати теплоти в стіл преса, Вт;  $Q_{\text{ос}}$  – втрати теплоти в навколишнє середовище крізь бічні стінки й поверхню рознімання, Вт;  $Q_{\text{бс}}$  – втрати тепла крізь болтові з'єднання, Вт;  $Q_i$  – інші втрати, Вт.

Корисна теплота, що витрачається на нагрівання прес-матеріалу

$$Q_k = c G_1 z (T_p - T_0),$$

де  $c$  – масова теплоємність прес-матеріалу, Дж/(кг·К);  $G_1$  – маса одного виробу;  $z$  – кількість виробів, що пресуються за годину, шт.

Втрати теплоти в стіл преса визначають аналогічно пусковому режиму, але за температури  $T_p$

$$Q_{\text{сп}} = f_k \frac{\lambda_{\text{пр}}}{\delta_{\text{пр}}} (T_p - T_{\text{п}}).$$

Втрати теплоти в навколишнє середовище крізь бічні стінки й поверхню рознімання



$$Q_{oc} = \tau \sum_1^n \alpha_p f_p (T_p - T_0),$$

де  $\tau$  – тривалість рознімання за одну годину роботи, с;  $\alpha_p$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $f_p$  – площа поверхні рознімання, м<sup>2</sup>.

Далі обчислюють сумарне значення споживаної потужності нагрівників, визначені окремо для обох півформ.

Тепловіддача для бічної поверхні матриці

$$\alpha_p = 1,1 \left( \frac{\lambda}{h} \right) (Gr Pr)^{0,02},$$

де  $h$  – висота гнізда матриці, м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К).

Для горизонтальної поверхні рознімання матриці

$$\alpha_p = 4,88 (T_p - T_0)^{0,19}.$$

Усі теплофізичні властивості беруть для визначальної температури

$$T_b = \frac{T_p + T_0}{2}.$$

Для всіх поверхонь пуансона в разі його обдування повітрям під час його переміщення

$$\alpha_p = 0,15 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Втрати тепла крізь болтові з'єднання

$$Q_{бс} = \frac{\lambda_{бт}}{l} F_{бт} (T_p - T_0) + \alpha_{бт} F_{ббс} \Delta T_б,$$

де  $\lambda_{бт}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу болта;  $l$  – відстань від верху вушка до столу преса, м;  $F_{бт}$  – переріз болта, м<sup>2</sup>;  $\Delta T_б$  – різниця температур по довжині болта, °С;  $F_{ббс}$  – площа бічної поверхні болтового з'єднання, м<sup>2</sup>;

$$\Delta T_б = \frac{T_p + T_{сп}}{2} - 20,$$

де  $T_p$ ,  $T_{сп}$  – температури прес-форми і столу преса, відповідно, °С.

Інші теплові втрати  $Q_i$  відповідно до експериментальних даних становлять 10–20 % від загальної витрати енергії.

## **6. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ І ПРИНЦИП ДІЇ ФОРМ ДЛЯ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ**

### **6.1. Загальні положення**

Серед усіх відомих у виробництві методів переробки пластмас одним з найбільш складних з точки зору використовуваного інструменту є лиття під тиском. Для виготовлення деталей цим методом для кожної деталі (або групи деталей) необхідно спроектувати і виготовити відповідну прес-форму, яку потім встановлюють на литтєву машину, або термопластавтомат (ТПА).

Форма для лиття пластмас під тиском – це основний елемент устаткування, що визначає конструкцію та якість готового полімерного виробу. Часто форми для лиття пластмас під тиском називають литтєвими формами або прес-формами.

Під час роботи форм для лиття термопластичних полімерів під тиском відбуваються такі процеси:

- упорскування, в процесі якого фронт розплаву просувається, поступово твердіючи на периферії ливникових каналів і формуючих порожнин;
- підживлення порожнини розплавом для компенсації усадки полімеру;
- охолодження відформованого виробу за умови відсутності надлишкового тиску;
- виштовхування виробу з відкритої форми.

Зазвичай литтєва форма в складеному вигляді складається з набору формоутворювальних плит, матриць і пуансонів, холодноканальної або гарячekanальної ливникової системи, системи виштовхування відформованих виробів, системи охолодження форми, вентиляційної системи і набору напрямних елементів. Технологія виготовлення форм подібна до технології штампів. В умовах сучасного промислового виробництва часто потрібно інтенсифікувати процес лиття пластмас. У цьому випадку виготовляють і використовують форми для одночасного виробництва декількох виробів. Такі прес-форми називають багатогніздовими (багатомісними).

Зазвичай прес-форма проектується для наступного виробництва певного виробу. Крім цього, існують так звані «модульні» форми, конструкція яких допускає застосування змінних елементів, що дають змогу змінювати конструкцію виробів або навіть повністю замінити певний виріб на інший. Отже, та сама прес-форма надає можливість в різний час виготовляти різну продукцію. До недоліків такої технології можна віднести трудомісткість операцій з періодичної заміни форм, необхідність більш ретельного й частого їх обслуговування, а також невеликий ресурс універсальних форм.

Якісні литтєві форми виконують з допуском формуючих елементів 0,005 мм. При цьому гарантійний ресурс інструментів досягає мільйонів литтєвих циклів.

Прес-форма складається зі значної кількості елементів, які мають точно сполучатися між собою.

Деталі прес-форм поділяють на нормалізовані та спеціальні. Конструкція нормалізованих деталей прес-форми може бути встановлена наперед, незалежно від конструктивних особливостей одержуваних за її допомогою виробів.

Будь-яка прес-форма на 50–95 % складається зі стандартних або нормованих за номенклатурою деталей, вартість яких становить від 10 до 60 % її повної вартості. Зрозуміло, що вартість прес-форми залежить як від її конструкції та геометрії відливки і вимог інструментального виробництва, так і від рівня підготовки конструктора прес-форми, його бажання і можливості застосувати відповідні стандартні елементи.

Натепер існують підприємства-виробники, які спеціалізуються на виготовленні нормалізованих елементів прес-форм. Зазвичай набір таких деталей із зазначеною їхньою вартістю подається в каталогах цих підприємств.

До спеціальних деталей прес-форми належать вставні матриці, пуансони, гладкі знаки, різьбові знаки, кільця та ін. Найбільш відповідальними деталями прес-форми з точки зору напружень, які виникають у них, є завантажувальні камери, вставні матриці та обойми прес-форми.

Виготовленням спеціальних деталей займається спеціалізоване інструментальне виробництво, зазвичай компанія, у якій безпосередньо замовляється прес-форма.

Під час проектування форми лиття під тиском необхідно враховувати такі чинники [1, 5]:

- 1) потрібну площину деталі необхідно розташовувати паралельно площині рознімання;
- 2) потрібно прагнути до мінімального шляху розплаву від ливникової втулки до формуючої порожнини, уникаючи лобових ударів і завихрень розплаву;
- 3) потрібно прагнути до утримання деталей і ливникової системи в рухомій частині форми за допомогою знаків, піднутрень, зворотних ухилів тощо;
- 4) місце розташування впускного ливника вибирають з умови оптимальності режиму заповнення формуючої порожнини та трудомісткості видалення ливника;
- 5) потрібно враховувати надійність установки арматури.

Для проектування литтєвих форм потрібні такі вихідні дані:

- об'єм упорскування ТПА, см<sup>3</sup>;
- тиск упорскування, МПа;
- зусилля змикання, кН;
- пластикаційна продуктивність, кг/год;

- об’ємна продуктивність упорскування,  $\text{см}^3/\text{с}$ ;
- мінімальний час відкриття/закриття форми, с;
- максимальна відстань між плитами, мм;
- хід рухомої плити при максимальній висоті форм, мм;
- максимальний хід виштовхувача, мм;
- відстань між колонами у світлі по вертикалі й горизонталі, мм;
- максимальна й мінімальна значення висоти форми, мм;
- марка полімеру;
- розміри виробів з допусками й чистотою поверхні;
- програма випуску виробу.

Радіус сферичної поверхні ливникової втулки має перевищувати радіус сфери сопла литтєвої машини на 1–2 мм, щоб після притиснення й деформації сопла забезпечити його щільне прилягання, запобігаючи витоків розплаву.

У формі, наведеній на рис. 6.1, вироби скидаються разом з ливниковою системою як суцільний виливок, після чого їх відокремлюють вручну або механізовано. Форми такого типу називають напівавтоматичними.

Існують також ручні форми, де вилучення виробів не автоматизовано, і автоматизовані форми, які забезпечують як виштовхування виливка, так і відокремлення ливникової системи. У деяких випадках, коли виштовхування виливка ускладнене, наприклад, унаслідок його значних габаритів або складної форми, застосовують спеціальні роботи-маніпулятори.

Приклад конструкції форми і схему виштовхування наведено на рис. 6.1 і 6.2.

Зазвичай у литтєвих машинах з гідромеханічним замиканням форм виштовхування відбувається за допомогою упору на задній плиті і хвостовика форми, а повернення виштовхувальної системи у вихідний стан – пружиною або контрштовхачами 23 (рис. 6.1). У машинах з прямим гідравлічним замиканням для цього передбачено спеціальний гідроциліндр.

Під час лиття виробів типу ковпачків або стаканчиків з тонким днищем звичайні виштовхувачі пробиватимуть його. Збільшення діаметра виштовхувача зменшує напруження зрізу, але при цьому зменшується міцність пуансона та стає проблемним його охолодження. У цьому разі застосовують зіштовхування виробів по їх контуру зіштовхувальною плитою.

Подвійне зіштовхування застосовують, коли потрібно забезпечити послідовне виштовхування виробу з двох різних оформлювальних поверхонь. Подвійне зіштовхування виробів не може бути здійснене лише зіштовхувальними плитами, оскільки вироби зависатимуть у порожнині плити, яка утворює ці борти. Одними же виштовхувачами можна зіштовхувати тільки дрібні і плоскі вироби. Решта деталей «проколюватиметься».

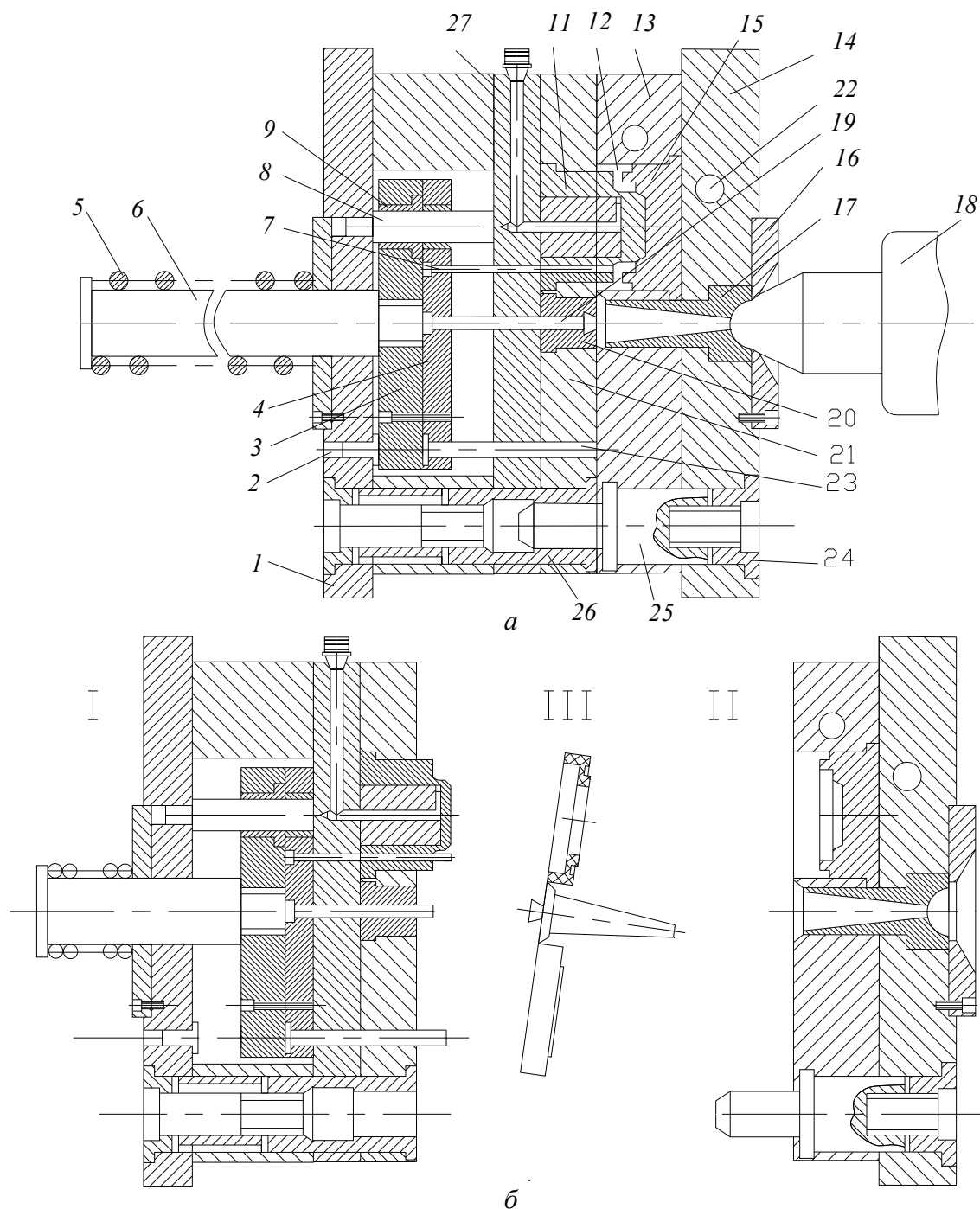


Рис. 6.1. Конструкція типової двогніздової форми для лиття під тиском кільцевої втулки з поліетилену: а – форма зімкнута; б – форма розкрита; I і II – рухома й нерухома півформи; III – виливок; 1 – рухома плита кріплення форми; 2 – упор; 3, 4 – плити виштовхувачів; 5 – пружина; 6 – хвостовик; 7 – виштовхувач; 8, 25 – напрямні колонки; 9, 26 – напрямні втулки; 10 – стійка; 11 – пуансон; 12 – гніздо прес-форми; 13 – обойма матриць; 14 – нерухома плита кріплення прес-форми; 15 – матриця; 16 – фланець; 17 – ливникова втулка; 18 – інжекційний циліндр; 19 – центральний виштовхувач; 20, 24 – втулки; 21 – обойма пуансона; 22 – канал; охолодження; 23 – поворотний штовхач; 27 – проміжна плита

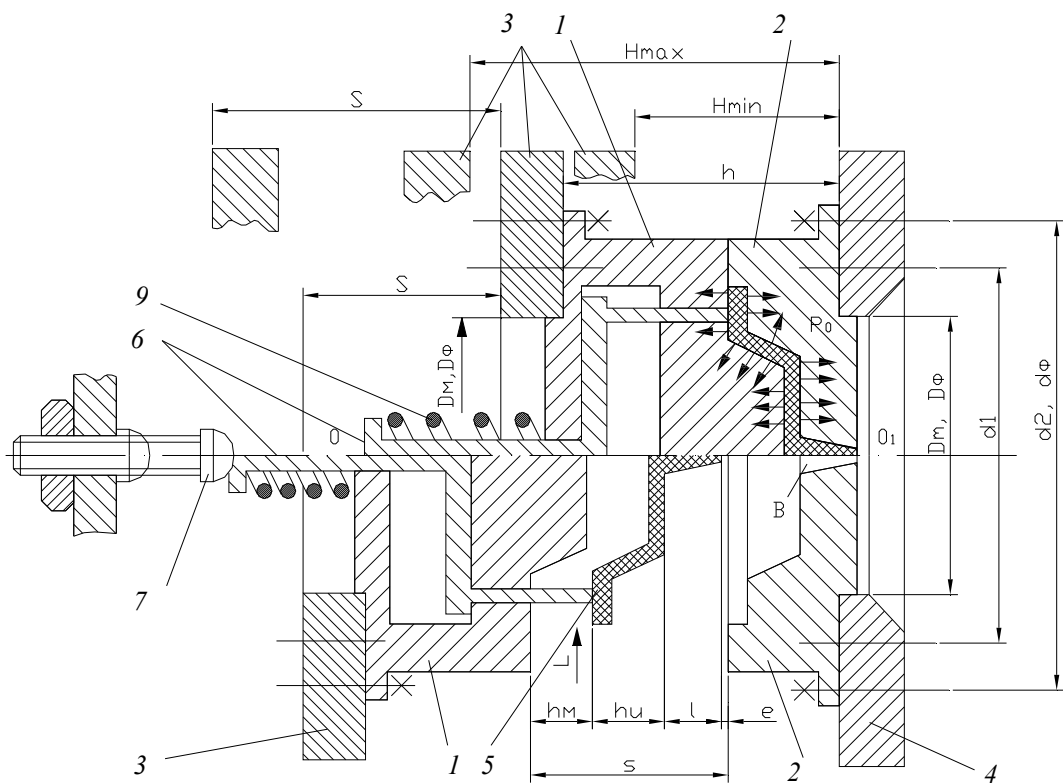


Рис. 6.2. Схема взаємодії форми для лиття під тиском термопласту з литтєвою машиною-автоматом: 1 – рухома півформа; 2 – нерухома півформа; 3 – плита рухомої півформи; 4 – плита нерухомої півформи; 5 – виріб; 6 – хвостовик; 7 – упор нерухомий; 8 – ливниковий канал; 9 – пружина

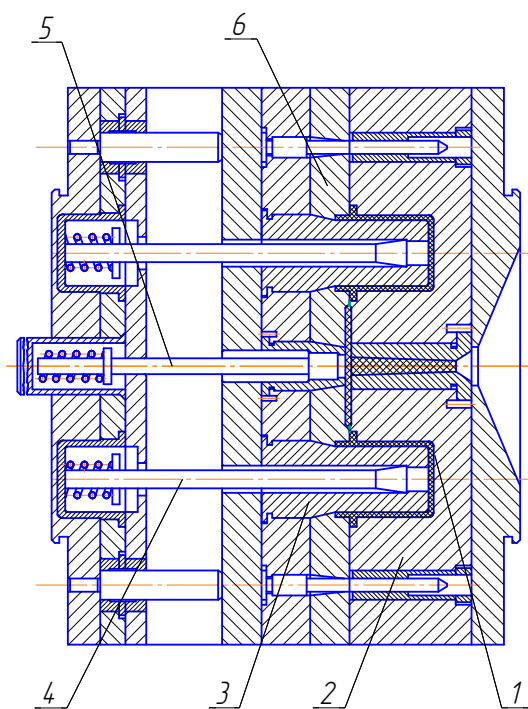


Рис. 6.3. Литтєва форма з подвійним зіштовхуванням виливків

На рис. 6.3 наведено зіштовхування виробу з бортом за допомогою зіштовхувальних плит, що здійснюють зіштовхування виробів з пуансонів 1 і скидачів 4, які витягують вироби з гнізд плити 6, а потім скидають їх [3].

Лиття відбувається у двохгніздовій формі крізь фланець борту. Плита 6 зіштовхує виріб з пуансона 1, скидач 4 викидає виріб з гнізда плити 6, а скидач 5 одночасно виштовхує ливник з піднутреного отвору втулки 3. Однак виріб також зависає на скидачі 4. Після замикання (до упорскування) скидач не повертається у вихідне положення, а упирається в дно матриці. Під час упорскування розплав тисне на виточку на скидачі з розмірами  $D-d$ , повертає його у вихідне положення і заповнює порожнину. Для виключення зависання виробів на скидачах 4 застосовують спеціальний пристрій, який повертає скидачі у вихідне положення після виштовхування до замикання форми, надаючи виробу можливість вільного падіння.

Для виготовлення виробів з різьбою в автоматизованих формах необхідно не просто здійснювати виштовхування, але і вигвинчувати з них при цьому різьбові знаки. Для вигвинчування різьбових елементів застосовують спеціальний привід або механічні передачі, що перетворюють поступальний рух хвостовика на обертальний рух знаків (рис. 6.4).

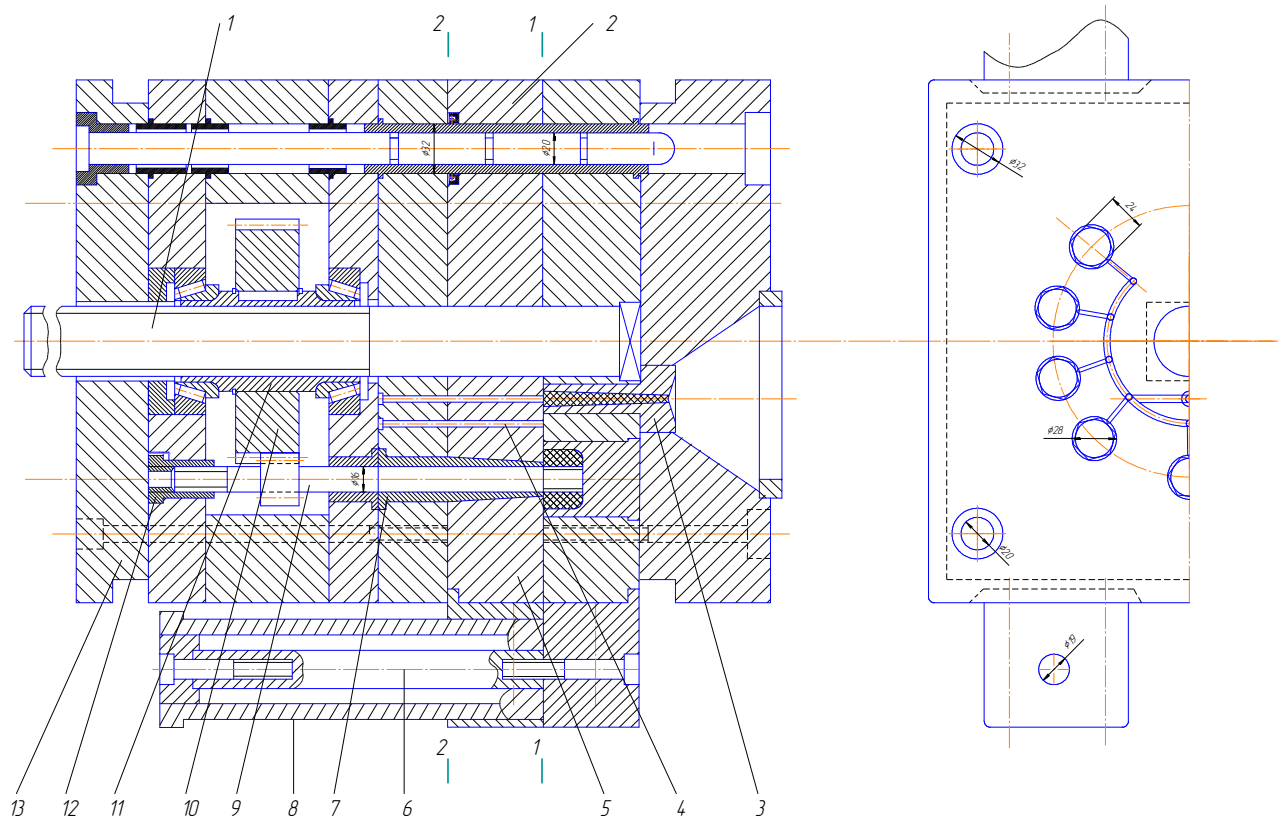


Рис. 6.4. Литвева форма з механічним згвинчуванням знаків

Форма, призначена для виготовлення виробу типу гайки з великою кількістю витків різьби [3], забезпечує автоматичне відокремлення ливника від виробу, вигвинчування різьбових знаків і скидання виробу.

Під час розкриття форми по площини 1–1 гайка 11 із закріпленою на ній шестернею 10, переміщаючись по закріпленому в нерухомій частині форми багатозахідному гвинту 1, обертає різьбові знаки 9. Під час обертання гайки знаки вигвинчуються з виробу і переміщаються у бік фланця 13 по різьбовій втулці 12. Для збільшення при цьому сил зчеплення виробу із втулкою 7 на її торці доцільно виконати невеликі виступи. У початковий момент розкриття форми впускний ливник відривається від виробу, і центральний ливник витягується із втулки 3.

Розкриття форми по площини 2–2, яке необхідне для відриву ливників від шпильок 4, здійснюється під дією телескопічної тяги, що складається зі стрижня 6 і втулки 8. Тяга працює в такий спосіб. У процесі розкриття форми по площини 1–1 спочатку стрижень 6 висувається із втулки 8, після чого стрижень, діючи на втулку, переміщає її відносно плити 2 доти, поки буртик втулки 8 торкнеться планки 5 плити 2. Така конструкція тяги дає змогу зменшити її довжину до довжини форми в зімкнутому вигляді.

## **6.2. Якість обробки і точність виготовлення деталей прес-форм**

Шорсткість за Ra для опорних площин рознімання рекомендується – 0,8, для формоутворювальних поверхонь – 0,2, а для різьб – 3,2.

Формоутворювальні поверхні деталей прес-форм залежно від властивостей і здатності полімерів до адгезії мають бути піддані обробці одного з таких видів: хромуванню, нікелюванню, азотуванню або оксидуванню.

При цьому найчастіше застосовують хромування (товщина шару покриття не менше 12 мкм), а у важкодоступних місцях – не менше 6 мкм.

Деталі, виготовлені з високолегованих високохромистих сталей (наприклад, сталі 30X13, 40X13 і 95X18) гальванічній обробці не піддаються, оскільки вони у своєму складі містять достатню кількість хрому.

Формоутворювальні поверхні до і після гальванічної або хіміко-термічної обробки поліруються, в основному в напрямі потоку розплаву і знімання деталі.

Допуск площинності опорних поверхонь плит і поверхонь рознімання, паралельності прилеглих поверхонь плит, матриць та обойм не повинен перевищувати 6-го квалітету згідно з ГОСТ 24643–81. Допуск перпендикулярності отворів під знаки, матриці, вкладиші відносно площини рознімання – не більше 0,02 мм. Допуски паралельності опорних поверхонь верхньої (рухомої) і нижньої (нерухомої) плит кріплення і паралельності



площини рознімання відносно опорних площин плит має відповідати 8-му квалітету, а допуск перпендикулярності колонок напрямних і втулок відносно опорних площин плит – 8-му квалітету.

Зміщення контурів формуютьвірвальных поверхонь матриці й пуансона по площини рознімання – не більше 0,05 мм. Формуютьвірвальные елементи форм виготовляють зазвичай по 8–9 квалітету, при цьому одержані в них вироби відповідатимуть 11–12 квалітету. Нерухомі з'єднання типу пуансона з тримачем, матриці із знаком, виконують за посадкою  $H7/k6$ , а рухомі з'єднання знаків-виштовхувачів з пуансоном і матрицею – за посадкою  $H9/f9$ .

Орієнтовні значення шорсткості різних поверхонь деталей подано на розрізі типової форми, зображеної на рис. 6.5.

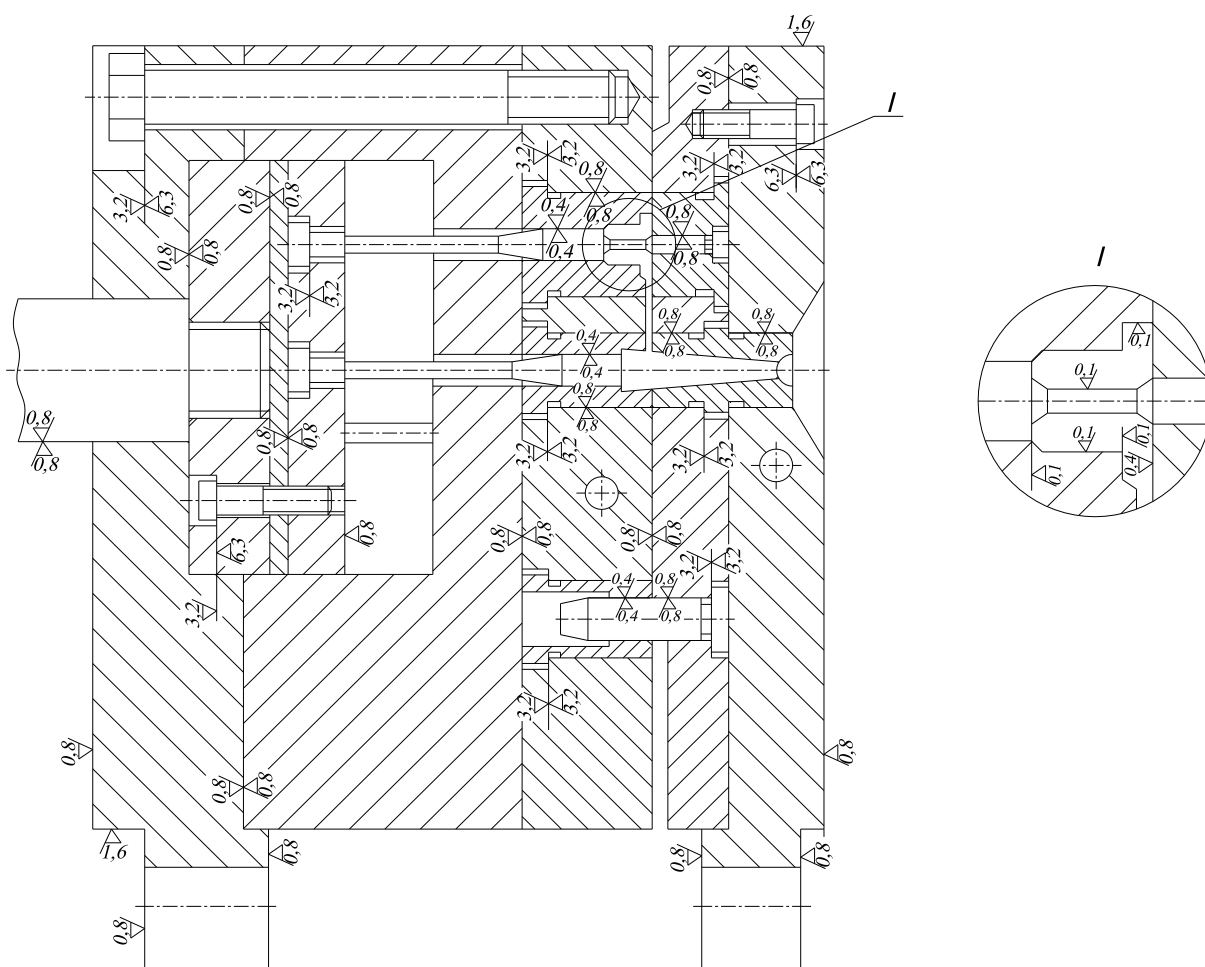


Рис. 6.5. Розріз форми для лиття із вказаною шорсткістю

### 6.3. Розрахунок робочих розмірів формуючих елементів форм

Найчастіше для полімерних виробів задаються 11–12 квалітетом точності, а для поверхонь, що не сполучаються, можна задавати 12 або 14 квалітет [4, 7].

Величина допуску на неточність виготовлення має у 2,3–2,8 рази перевищувати коливання значень усадки.

Заздалегідь визначаємо найменше і найбільше поля допуску:

$$T_{\min} = 2,3 \cdot \Delta\beta \cdot D \cdot 10^{-2};$$

$$T_{\max} = 2,8 \cdot \Delta\beta \cdot D \cdot 10^{-2},$$

де  $\Delta\beta$  – величина коливання значень усадки, %;  $D$  – номінальний розмір виробу, мм.

За таблицями граничних відхилень для різних розмірів виробу призначають квалітети, найближчі до розрахункових полів допуску.

Для виготовлення виробів точною до 12 квалітету допуск на виготовлення матриці беруть  $H7$ , а пуансона –  $h6$ . Для виготовлення виробів по 13–14 квалітетам допуск на виготовлення матриці становить  $H8$ ,  $H9$ , а пуансона –  $h8$ ,  $h9$ .

### 6.4. Розрахунок виконавчих розмірів охоплювальних елементів форм

Максимальний розрахунковий розмір формуючої порожнини

$$D_p^{\max} = (D + 0,8\beta D \cdot 10^{-2} - I - x_m)^{+x_m},$$

де  $D$  – номінальний розмір формуючої порожнини, мм;  $\beta$  – мінімальна усадка, %;  $x_m$  – допуск на неточність виготовлення матриці згідно квалітету, мм;  $I$  – допуск на знос формуючої поверхні, мм (зазвичай беруть  $I=0,02$  мм).

Мінімальний розрахунковий розмір формуючої порожнини:

$$D_p^{\min} = (D - 0,8\Delta_b - I + \beta_1 D \cdot 10^{-2})^{+x_m},$$

де  $\Delta_b$  – допуск на виріб для поверхні типу валу, мм,  $\beta_1$  – максимальна усадка, %.

Перевіряємо дійсний розмір:

$$D_d^{\max} = D_p^{\max} - D\beta \cdot 10^{-2} + \Delta_b;$$

$$D_d^{\min} = D_p^{\min} - D\beta_1 \cdot 10^{-2}.$$

## 6.5. Розрахунок виконавчих розмірів охоплюваних елементів форм

Заздалегідь визначаємо величини допусків на виготовлення полімерного виробу й деталі форми.

Максимальний розрахунковий розмір пуансона

$$d_p^{\max} = (d + \Delta_o + \beta d \cdot 10^{-2})_{-x_n},$$

де  $d$  – номінальний діаметр отвору у виробі, мм;  $\Delta_o$  – допуск на виріб для поверхні типу отвору, мм,  $x_n$  – допуск на неточність виготовлення пуансону згідно квалітету, мм.

Мінімальний розрахунковий розмір пуансона

$$d_p^{\min} = (d + \beta_1 d \cdot 10^{-2} + I + x_n)_{-x_n}$$

Перевіряємо дійсний розмір:

$$d_d^{\max} = d_p^{\max} - \beta_1 d \cdot 10^{-2};$$

$$d_d^{\min} = d_p^{\min} - \Delta_o - \beta d \cdot 10^{-2}.$$

Дійсні розміри виробу не повинні виходити за границі призначеного поля допуску, в іншому разі його значення потрібно змінити.

## 7. ЛИВНИКОВІ СИСТЕМИ

### 7.1. Загальні положення

Ливникові системи складаються з трьох елементів:

- 1) центрального ливникового каналу, по якому розплав надходить у форму;
- 2) розвідного каналу, що відгалужується від основного у бік гнізда;
- 3) впускного каналу, по якому розплав надходить безпосередньо в формуючу порожнину (рис. 7.1).

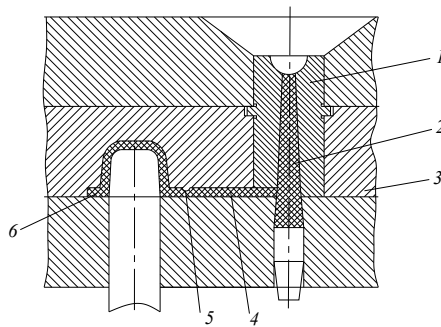


Рис. 7.1. Структура елементів ливникової системи: 1 – ливникова втулка з основним каналом; 2 – центральний ливник; 3 – плита ливникова; 4 – розвідний ливник; 5 – впускний ливник; 6 – виріб

Центральний ливниковий канал виконується у ливниковій втулці, утворюючи центральний ливник (рис 7.2).

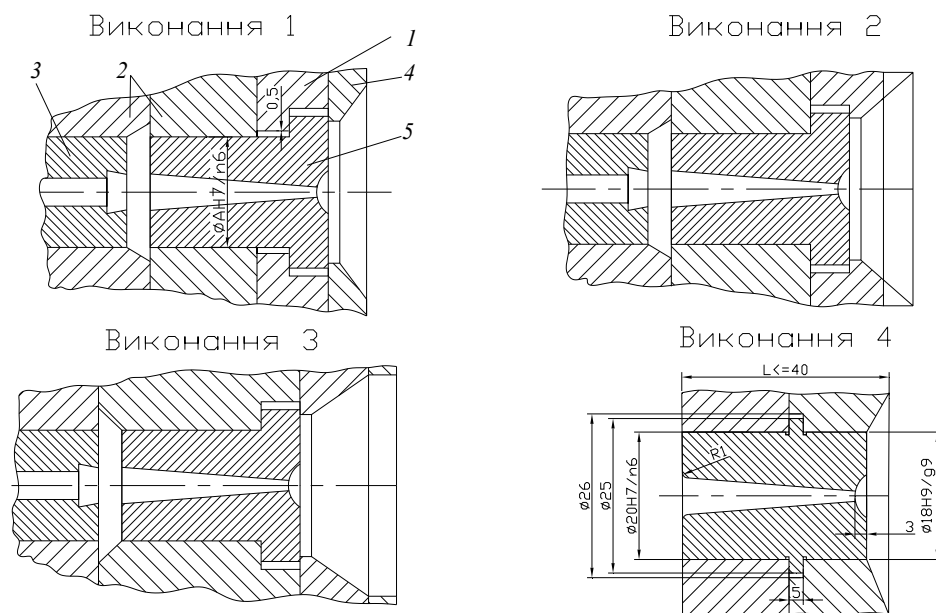


Рис. 7.2. Конструкція і приклади установки стандартної центральної ливникової втулки: 1 – плита кріплення; 2 – плита; 3 – втулка центральна; 4 – фланець; 5 – ливникова втулка

Розвідні канали можуть розташовуватися в ливниковій плиті або в площині розлівання, фрезеруючись в одній або двох суміжних плитах (рис. 7.3). Оскільки під час руху в каналах розплав найбільш рухливий у центрі, а на периферії охолоджується і стає більш в'язким, то відношення об'єму до площі поверхні каналу має бути найбільшим. Тому оптимальною формою поперечного перерізу є кругла (варіант *а*). Проте такий канал у разі криволінійної подовжньої форми й розташування під кутом до ребер форми нетехнологічний: свердління в одній плиті може виявитися неможливим, а під час фрезерування в суміжних плитах ділянки каналу можуть зміститися одна відносно одної. Тому частіше застосовують канали, виконані в одній плиті (рис. 7.3, *б–г*).

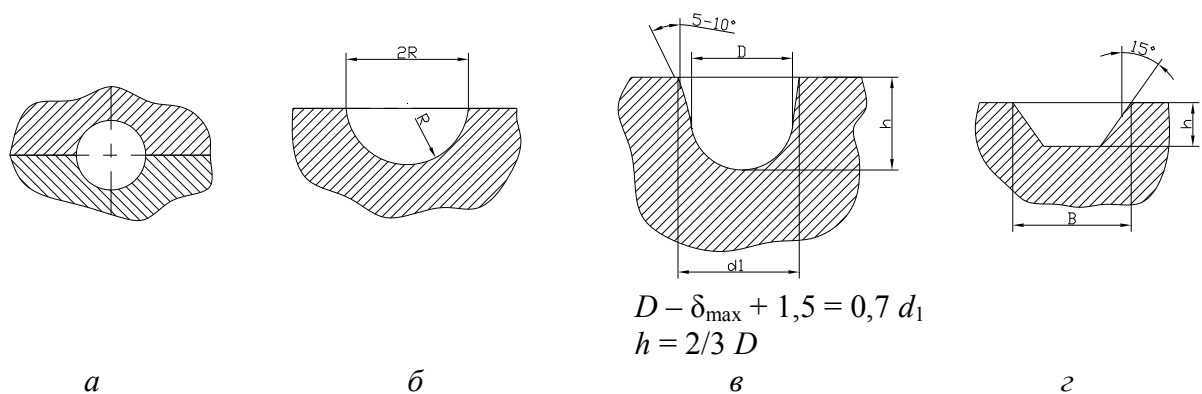


Рис. 7.3. Перерізи розвідних каналів

Найбільш раціональною формою перерізу каналу, що фрезерується в одній плиті, є варіант виконання *в*, проте внаслідок складності виготовлення різального інструменту потрібної форми часто застосовують варіант *г* [5].

По розташуванню в плані розвідні канали можуть бути прямолінійними, радіальними й комбінованими (рис. 7.4).

При прямолінійному розташуванні заповнення гнізд відбувається нерівномірно і вироби виходять різної якості: чим ближче до ливника, тим якість вище, а на периферії можливі дефекти, наприклад, недоливи.

Радіальне розташування дозволяє одночасно заповнити всі гнізда, але конструктивно це незручно, тому часто застосовують комбіновані схеми.

Слід прагнути до найкоротшого шляху від центрального ливника до впускного каналу, тому що велика довжина сприяє втратам тиску, вимагає збільшення перетину, що призводить до втрат матеріалу на об'єм ливникової системи.

Чим більше об'єм і товщина стінки виробу, тим більшим має бути переріз розвідного каналу. При масі виробу до 200 г еквівалентний діаметр основного розвідного каналу (в мм) визначають за емпіричною формулою

$$D = \frac{G^{1/2} \cdot L^{1/4}}{8}$$

де  $G$  – маса виробу, гр;  $L$  – довжина каналу, мм.

Зазвичай найбільший розмір перерізу розвідного каналу виконують не меншим за 3 мм.

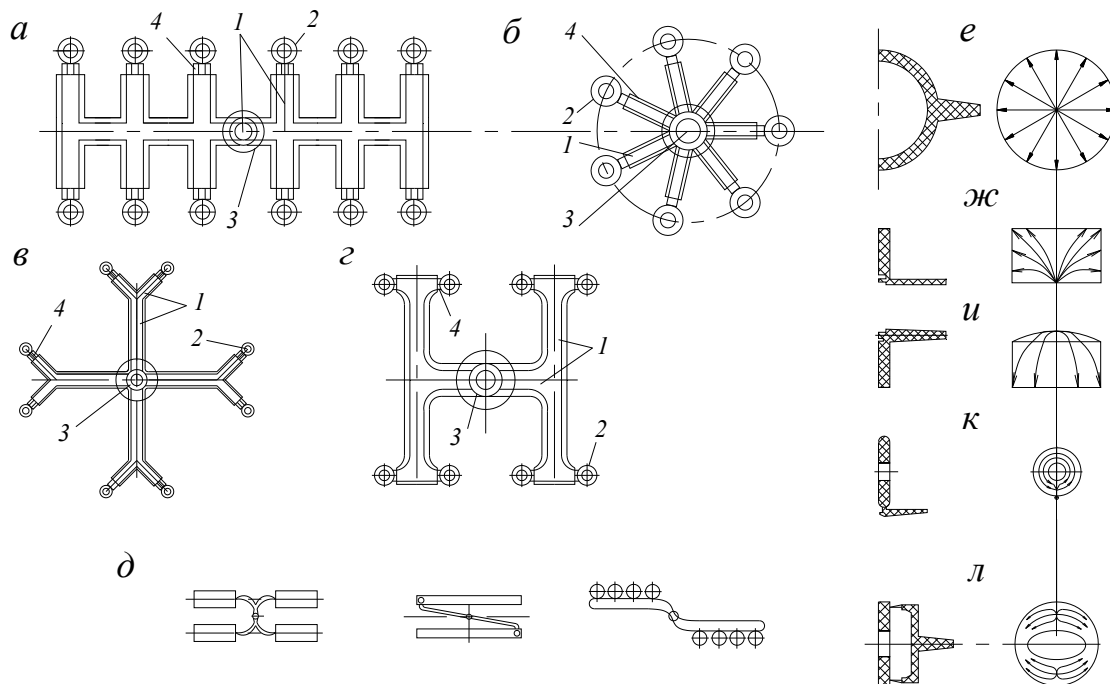


Рис. 7.4. Схеми розташування ливникових та впускних каналів (а–д) і руху розплаву в порожнинах форми (е–к): а – прямолінійне розташування; б – радіальне; в – радіальне з розвідними каналами, що розгалужуються; г – комбіноване; д – паралельне і рядне; е – центральний ливник; ж – точковий ливник для площини; и – щілинний ливник; к – точковий ливник для кільця; л – точковий ливник з двома впусканнями; 1 – розвідний канал; 2 – виріб; 3 – основний канал; 4 – впускний канал

## 7.2. Впускні ливникові канали

Впускні ливникові канали, які є продовженням розвідного каналу, безпосередньо примикають до формуючої порожнини. Їх виконують більш вузькими, ніж останні, для підвищення температури і текучості розплаву, а також для полегшення відокремлення виробів від ливникової системи.

Для обрання місця розташування впускних каналів необхідно врахувати на низку умов, зокрема впускні канали потрібно розташовувати так, щоб:

1) під час упорскування напрям руху потоку розплаву збігався з напрямом найбільших експлуатаційних зусиль, і при цьому не залишалося зварних швів;

2) за можливістю було забезпечене рівномірне заповнення та одночасне досягнення розплавом країв формуючої порожнини;

3) виріб у цих місцях мав найбільшу товщину й був на максимальній відстані від ділянок з тонкими стінками. В іншому разі підживлення товстостінних ділянок розплавом погіршується через швидке тверднення

тонкостінної ділянки і для виробів характерні наявність раковин, утяжин і значний розкид розмірів.

Порожнина має заповнюватись в напрямку потоку прямолінійним ламінарним фронтом, а не вільним струменем, краї якого охолоджуються на повітрі й потім погано зварюються між собою, а також захоплюють повітря з подальшим утворенням раковин у виробі.

Площа перерізу каналу не повинна бути занадто малою, оскільки це призводить до більших втрат тиску, ускладнює заповнення форми та сприяє утворенню внутрішніх і зовнішніх усадочних дефектів і дефектів у зоні впуску (смуги, складки та ін.); крім того, можлива термічна деструкція матеріалу через його перегрів при проходженні з високою швидкістю крізь канал малого перерізу.

Площа перерізу каналу не повинна бути занадто великою, оскільки це ускладнює відділення ливників і погіршує зовнішній вигляд виробу (помітні сліди від ливника), а також призводить до зайвого ущільнення розплаву, збільшенню ступеня орієнтації полімеру у виробі та утворення значних внутрішніх напружень у зоні впуску.

Для зниження гідравлічного опору перехід від розвідного до впускного каналу має бути достатньо різким, а його довжина має бути якомога меншою (0,5–0,8 мм, максимально 1,2 мм) (рис. 7.5).

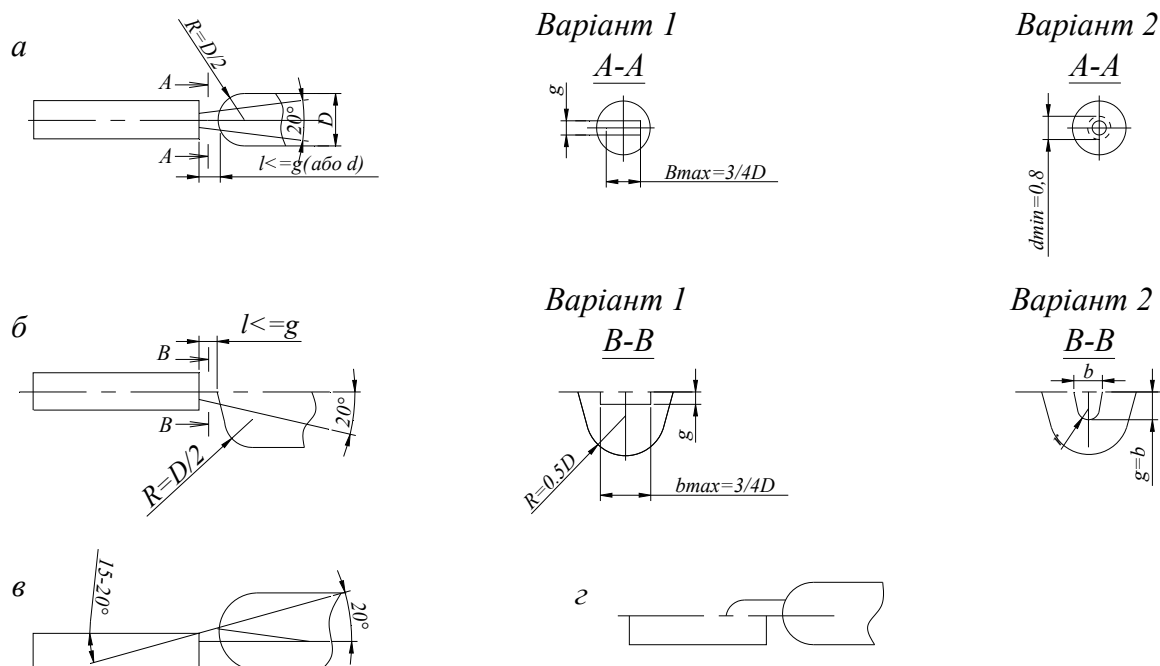


Рис. 7.5. Види впускних ливників: *а* і *б* – прямокутні або круглі торцеві (*а* – гніздо і розвідний канал виконані в двох плитах форми; *б* – гніздо і розвідний канал виконані в одній плиті форми); *в* – похилий; *г* – накладний; *д-к* – щілинні і кільцеві; *л* – віяловий; *м* – парасольковий

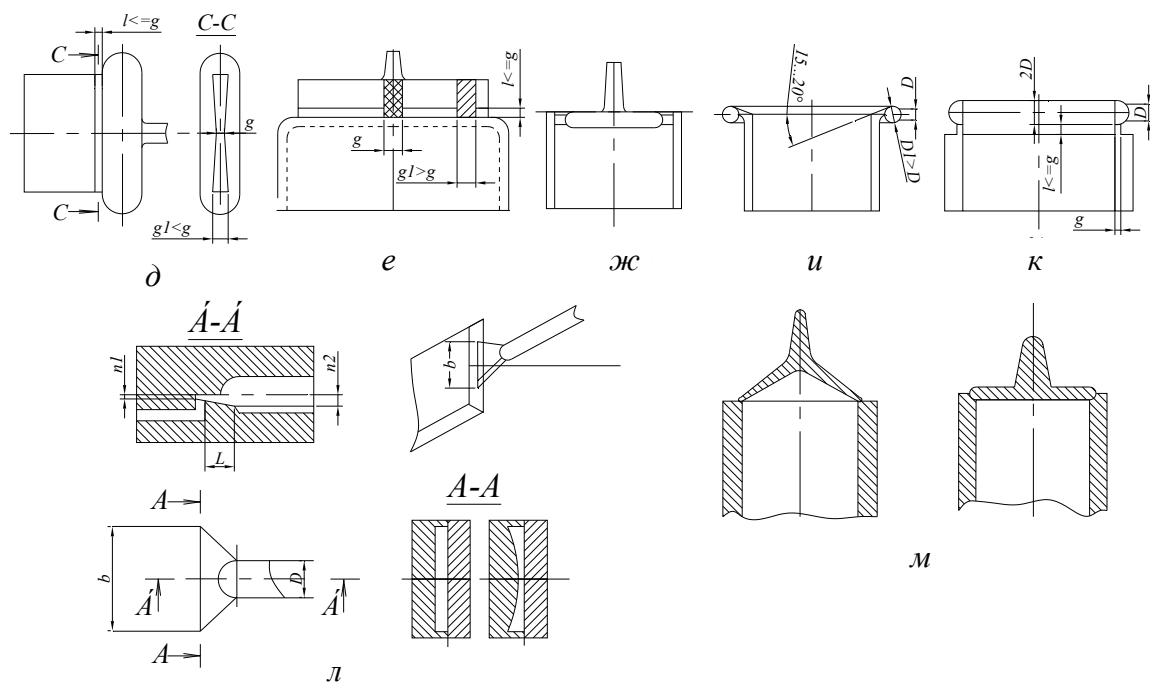


Рис. 7.5: Закінчення. (Див. також с. 46)

Усі зазначені типи ливникових систем мають такі недоліки:

- втрата тиску в каналах;
- втрата матеріалу на ливникову систему (за малих виробів і великій гніздовості – до 70 %);
- неоднорідність якості виливків.

### 7.3. Типи ливникових систем

Недоліки ливникових систем, що розглянуто вище, істотно усувають **точкові ливникові системи**.

У них деталь відливається крізь циліндричний або конічний впускний канал мінімального діаметра. При цьому матеріал значно розігрівається внаслідок дисипації та його тертя по стінках форми. Тому зусилля, потрібне для його продавлювання, істотно знижується. Тонкостінні вироби (до 3 мм) виходять без утяжин в місці упорскування. Ливник може автоматично відриватися під час рознімання й виштовхування. Матеріал в ньому швидше твердне, що скорочує час циклу і зменшує внутрішні напруження у виробі.

Залежно від конструкції точкові ливникові системи поділяють на такі типи (рис. 7.6):

- 1) З відривним ливником. Ці системи можуть застосовуватися в багатогніздових формах.
- 2) Безливникові. Ці системи застосовуються в одnogніздових формах. Розплав до впускного каналу подається безпосередньо із сопла литтєвої



машини. Добре працює для виготовлення деталей завтовшки до 2 мм. При використанні низьков'язких матеріалів необхідно застосовувати самозакривний мундштук.

3) З передкамерою. Камера цієї системи постійно заповнена розплавом, об'єм якого достатньо великий, щоб не тверднути між упорскуваннями й не перешкоджати їм. Застосовується для переробки термостабільних полімерів.

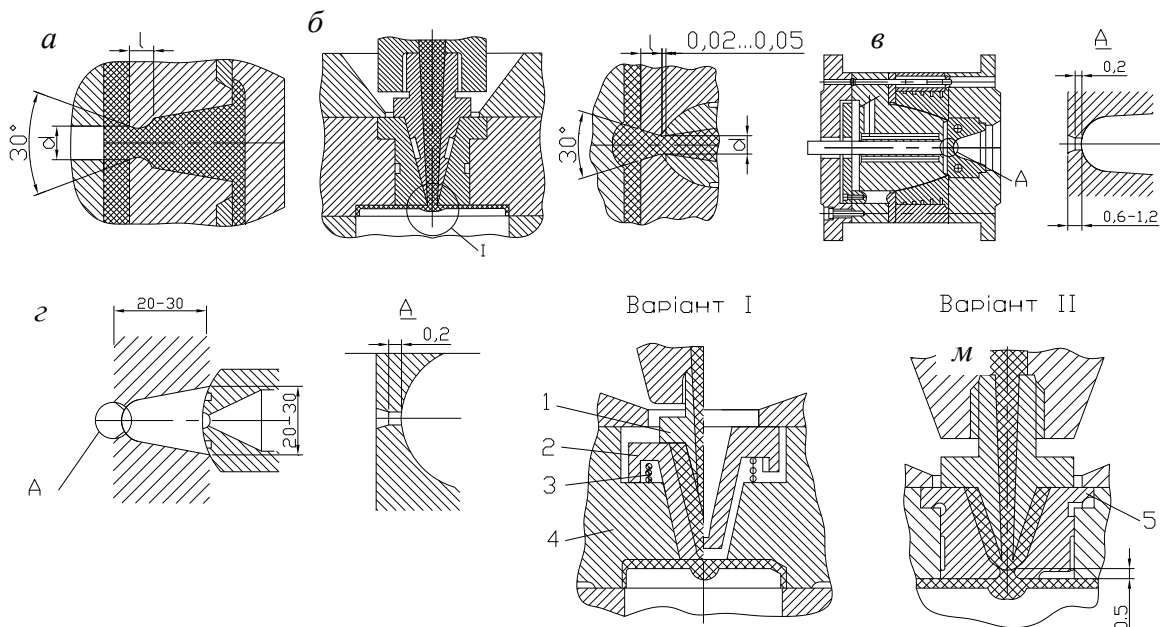


Рис. 7.6. Основні типи точкових впускних каналів: *а* – з відривним ливником; *б* – безливникові; *в* – з передкамерою для деталі типу стакана (справа з поглибленням навпроти ливника); *г* – з підпружиненою передкамерою (*1* – мундштук; *2, 5* – передкамери; *3* – пружина; *4* – матриця).

**Тунельні ливникові канали** є різновидом точкових і вирізняються тим, що розплав підводиться в формуючу порожнину не по поверхні розлімання форми, а крізь тунель, виконаний у стінці матриці. Рекомендовані розміри тунелю [3] наведено на рис. 7.7 (для крихких матеріалів  $\alpha \leq 20^\circ$ , а для еластичних –  $\alpha \leq 50^\circ$ ).

Розміри виготовлених виробів майже не обмежують застосування тунельних ливників, які можна використати для переробки майже всіх видів високотоннажних термопластів (полістирол, поліпропілен, поліаміди, у тому числі склонаповнені, поліформальдегід та ін.). При розкритті форми розвідні ливники значно деформуються, і ливник легко вилучити з тунелю.

Під час переробки крихких матеріалів вигин розвідного ливника може спричинити його руйнування, особливо якщо цей ливник має невелику довжину. У зв'язку з цим необхідно, щоб його приведений діаметр перевищував найбільшу товщину одержуваного виробу не менше ніж на

1,5 мм. У цьому разі він не повністю твердне до моменту виштовхування виробу з форми й залишається досить пружним.

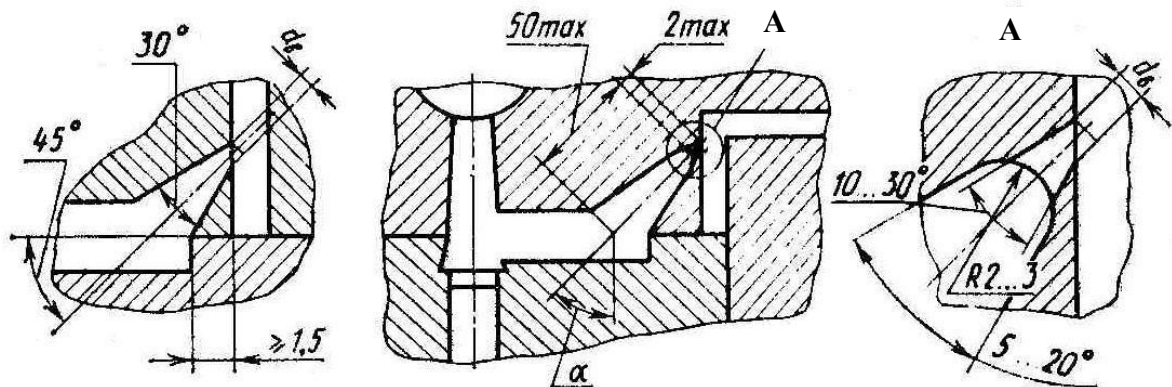


Рис. 7.7. Рекомендована конфігурація тунельних впускних ливників

Застосування тунельних ливників дає змогу автоматизувати процес лиття, виключити наступну механічну обробку ливника, оскільки гострі крайки тунельного впускного каналу в формуючій порожнині забезпечують чистий зріз ливника з виробу при вилученні його з форми. Для запобігання сколювання гострих крайок тунельного впускного каналу не рекомендується розташовувати їх у матриці з цементованої сталі.

Тунельний ливниковий канал за потреби дає змогу здійснити підведення розплаву до внутрішньої порожнини виробу (рис. 7.8,а).

Вигнутий ливниковий канал (рис. 7.8,б,в) доцільно застосовувати для лиття поліетилену й пластифікованого полівінілхлориду. При цьому для надійного видалення ливника він повинен мати достатню довжину розвідного каналу:  $l = (3...6) d \geq 15$  мм (рис. 7.8,б), мінімальний кут конуса вигнутої частини  $3^\circ$  і радіус вигнутої частини  $R = (2,5...3) d$ .

Для зрізу тунельного ливника у всіх випадках потрібно передбачати заходи з утримання виливка й ливникової системи на рухомій частині форми. Зазвичай це забезпечують, виконуючи піднутрення у виливку або використовуючи спеціальні зачепи під ливниковою системою (рис. 7.9,а).

Підводити розплав матеріалу до точкового впускного каналу в багатогніздових формах можна як безпосередньо від центрального ливника (рис. 7.9,б), так і крізь розвідні ливники (рис. 7.9,в,г).

При підведенні розплаву до тунельних ливників, розташованих у нерухомій частині форми, крізь радіальні розвідні канали, для утримання ливникової системи на рухомій частині форми й вилучення тунельного ливника в більшості випадків не треба передбачати спеціальні зачепи для розвідних ливників. За лінійного розташування гнізд багатогніздової форми для кожного розвідного ливника потрібно передбачати зачепи й постачати форму додатковими виштовхувачами.

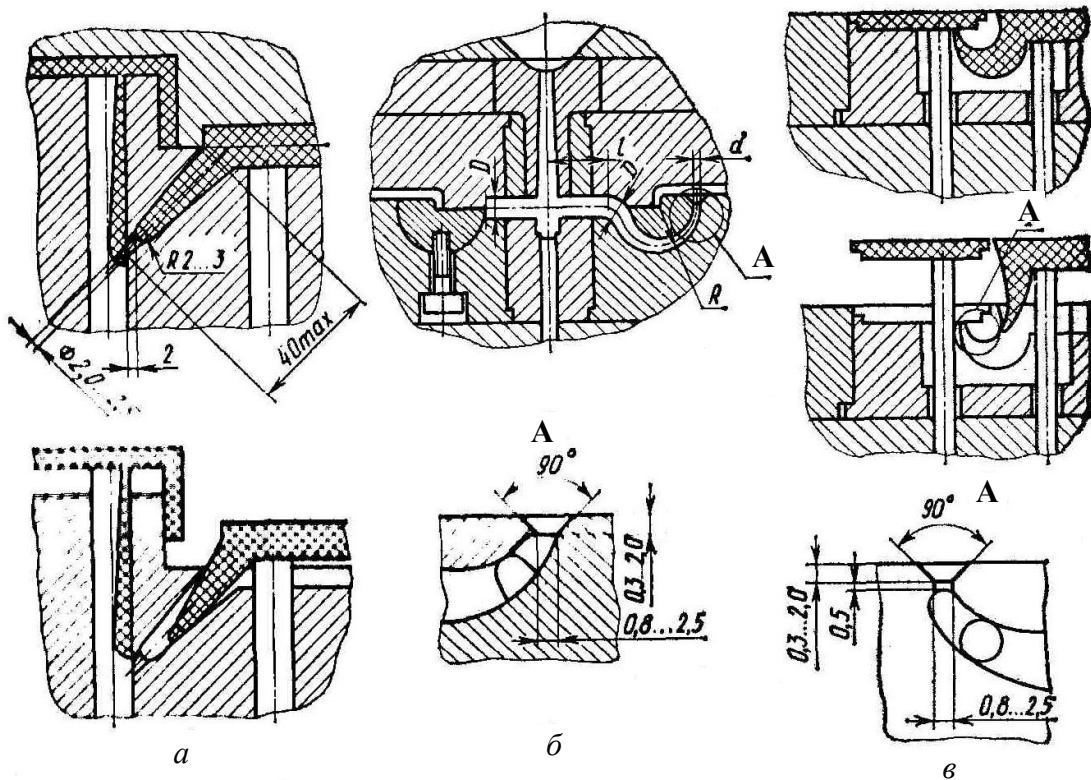


Рис. 7.8. Конфігурація тунельних ливників до внутрішніх поверхонь виробів

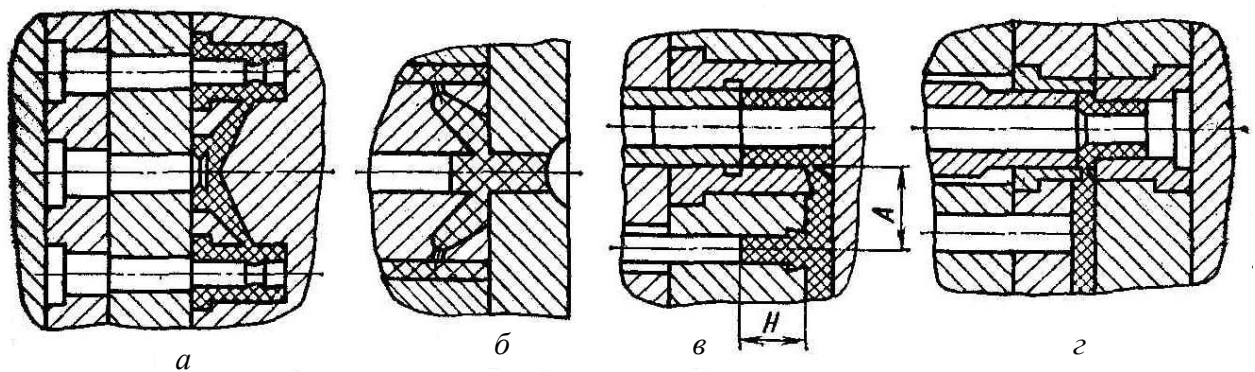


Рис. 7.9. Схеми ливникових систем при застосуванні тунельних ливників

Надійне видалення розташованих у рухомій частині форми тунельних ливників, здійснюване спеціальними виштовхувачами, забезпечують установкою в розвідних ливників спеціального напрямного стрижня. Довжина цього стрижня становить  $H \geq A$  (де  $A$  – сума довжин підвідного і тунельного ливників; для крихких матеріалів  $A = 20$  мм, для еластичних –  $A = 10...15$  мм).

Приклад конструктивного виконання тунельної ливникової системи фірми HASCO наведено на рис. 7.10.

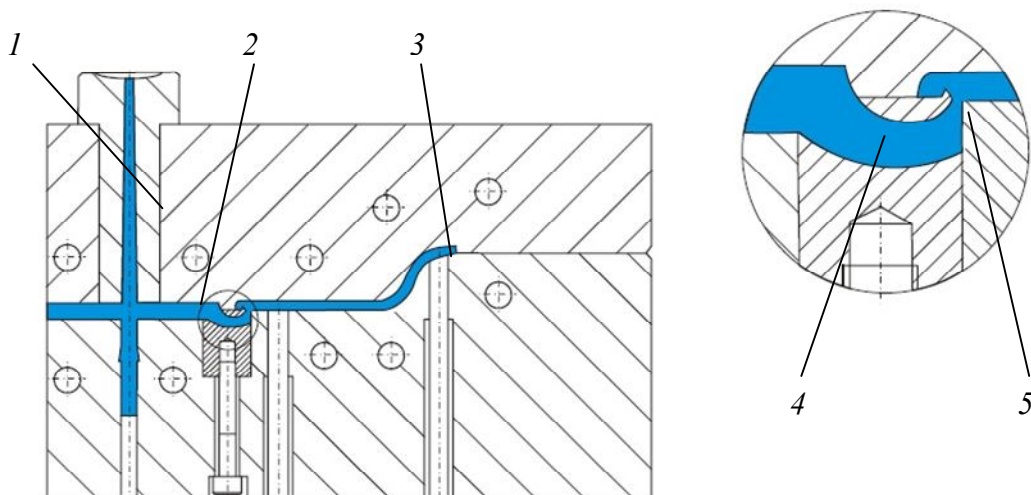


Рис. 7.10. Схема тунельної ливникової системи фірми HASCO:  
 1 – центральний ливник; 2 – розвідний ливник; 3 – виріб; 4 – впускний тунельний ливник; 5 – гострий пруг для зрізання ливника

Для надійного відривання впускного ливника виштовхування ливникової системи та деталі має відбуватись не одночасно, що досягається, наприклад, різною довжиною ходу та неодноточним початком дії виштовхувачів центрального ливника та відформованих деталей.

## 7.4. Вентиляційні канали

Вентиляційні канали виконують на поверхні плит в площині рознімання для відведення повітря з порожнини форми під час упорскування, щоб уникнути утворення дефектів у виробі.

У ряді випадків можна обійтись і без них, якщо зазори рухомих з'єднань і площини змикання виявляються достатніми для цього.

Площа поперечного перерізу вентиляційних каналів визначають за емпіричною залежністю (см<sup>2</sup>)

$$F_b = 0,05V,$$

де  $V$  – об'єм деталі, см<sup>3</sup>.

Ширина вентиляційних каналів має бути меншою, ніж впускного, а глибина становити 0,03–0,06 мм.

Вентиляційні канали фрезерують алмазним інструментом після випробування форми в разі виявлення недостатності природної вентиляції.

## 8. ГАРЯЧЕКАНАЛЬНІ ФОРМИ

### 8.1. Загальні положення

Гарячечанальною називають форму, у якій розвідний ливник залишається розплавленим і не витягується під час циклу лиття. Натепер у різних країнах, залежно від рівня їх технічного розвитку, гарячечанальними формами переробляють від 10 до 30 % термопластів. Гарячечанальна технологія вважається перспективною, і тому її застосування поширюється. Під час лиття під тиском виробів у гарячечанальних формах забезпечується найбільш рівномірне заповнення та ущільнення формуючих порожнин.

У виробництві великогабаритних виробів замість форм з одним впускним каналом доцільно застосовувати багатовпускні гарячечанальні форми. Вибір кількості гнізд у формах має передувати визначенню потужності, об'єму впорскування, зусилля замикання й типорозміру литтєвої машини з урахуванням асортименту виробів, що склався; потреби в них; термінів постачання виробів замовнику; самоокупності витрат на виготовлення форм; мінімальній питомій трудомісткості й собівартості форми і виробів; максимально можливого вивільнення виробничого персоналу; багатоверстатного обслуговування литтєвих машин на основі повної автоматизації процесу без застосування ручної праці; ефективності використання потужності литтєвої машини, зокрема продуктивності вузла пластикації, об'єму та швидкості впорскування, а також зусилля замикання за мінімального тиску в порожнині форми; а також довговічності гарячечанальних форм за умови зняття 1 млн виробів з одного гнізда форми [8, 11, 15].

Переваги гарячечанальної технології такі:

- 1) повна відсутність відходів ливників;
- 2) виключена операція відриву ливника від виробу;
- 3) розплав полімеру максимально наближений до формоутворювальної камери, що сприяє підвищенню якості одержуваних виробів;
- 4) зазначена в п. 3 обставина також дає змогу виготовляти великі за розміром вироби (наприклад, пластмасові меблі) з мінімальною товщиною стінки і, отже, ефективніше використовувати дорогий полімерний матеріал;
- 5) скорочується час циклу.

Усі зазначені переваги дають змогу збільшити максимальну площу лиття на одній і тій самій машині на 30–40 % порівняно з площею лиття, що досягається за умови використання ливникової системи, яка твердне, або застосовувати за тієї самої площі лиття машину з меншим зусиллям замикання й менш металоємними формами. Лиття за зниженого тиску й підвищеної температури порожнини форми забезпечує отримання виробів з меншими залишковими напруженнями, поліпшує умови заповнення форми та ущільнення розплаву, а також умови експлуатації форми з підвищенням її довговічності.

Тим не менше, гарячечанальна технологія має і недоліки:

- 1) асортимент перероблюваних полімерів обмежений вимогами термостабільності;
- 2) розплав полімеру має бути малов'язким (показник текучості розплаву (ПТР) має перевищувати величину 8 г/10 хв);
- 3) гарячий блок форми оснащений високочастотними пристроями терморегулювання та управління, що вимагають узгодження з управлінням ТПА;
- 4) конструкція, будова та обслуговування форми істотно складніші порівняно з холодноканалними формами.

Усі зазначені недоліки є причиною високої вартості гарячечанальних форм, застосування яких потребує ретельного техніко-економічного обґрунтування (тираж виробів, їхня ринкова вартість, тривалість попиту та ін.).

Найбільшою перевагою гарячечанальних систем (ГКС) порівняно з холодноканалними системами (ХКС) є відсутність розвідних ливників, які потребують наявності відповідного обслуговування й наступної утилізації. Відсутність подібних ливників дає змогу скоротити час пластикації, крім того, зменшуються час охолодження ливникової системи й необхідне зусилля відкриття форми.

Форма з ГКС (рис. 8.1) складається з двох частин: холодної матриці 10, у якій відбувається формоутворення виробів, і значно складнішої гарячої частини. Обігрівні гарячі канали форми постійно заповнені розплавленим полімером. Гарячечанальна частина форми споряджена точковими вузлами впорскування, що складаються з позицій 7, 8, 11. Гаряча частина форми відокремлена від холодної повітряним зазором 5 і керамічними теплоізоляторами 4.

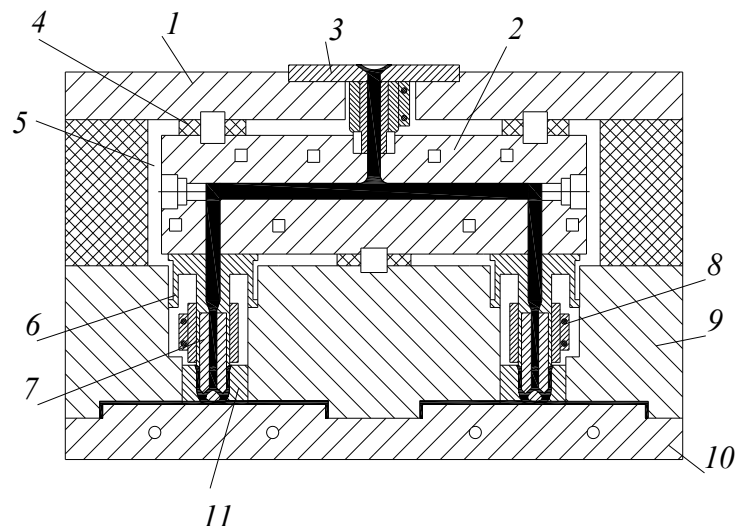


Рис. 8.1. Будова гарячечанальної форми: 1 – плита; 2 – гарячечанальна камера (колектор); 3 – шайба ливника; 4 – теплоізолятори; 5 – повітряний зазор; 6 – втулка установча; 7 – сопло; 8 – нагрівник сопла; 9 – матриця; 10 – пуансон; 11 – передкамера

Конструкція ГКС аналогічна конструкції ХКС форми з трьома плитами: центральний ливниковий канал також проходить за плитою матриць, забезпечуючи гнучкість при виборі розташування місця впускання. Однак це можливо без великих втрат тиску, які мають місце в ХКС. Ця перевага досягається за рахунок використання каналів більшого перерізу, ніж зазвичай використовуються в ХКС.

ГКС складається з двох основних частин: колектора й системи сопел. Колектор ГКС, що розташований усередині нерухомої півформи, доставляє розплав із сопла литтєвої машини у вибрані місця за плитою матриць. Потім сопла ГКС забезпечують проходження розплаву з колектора безпосередньо в формуючу порожнину або крізь холодний розвідний ливник, який може живити багатогніздову форму (непряма подача). Сопло ГКС зазвичай розташовується під кутом  $90^\circ$  до колектора ГКС і проходить за плитою матриць.

Колектор ГКС може бути або таким, що нагрівається, або ізолюваним. Сопла ГКС бувають такими, що нагріваються, теплопровідними або ізолюваними. Колектор, що нагрівається, і кожне сопло мають власні нагрівник і регулятор температури. Теплопровідні сопла виконують з матеріалів з високою теплопровідністю, наприклад, з берилієвої бронзи, і проводять теплоту від колектора. Ізолювана ГКС не має іншого прямого джерела тепла, крім розплаву полімерного матеріалу, що протікає крізь неї.

## **8.2. Колектори і сопла із зовнішнім нагріванням**

Системи із зовнішнім нагрівом здатні забезпечувати найменшу втрату тиску у формі. Канали течії циліндричні в поперечному перерізі й зазвичай мають більший діаметр, ніж у холодноканальних формах. Циліндрична форма каналу є найбільш ефективною для течії розплаву, а оскільки охолодження розвідного ливника та його подальше дроблення тут не потрібні, то допускається більший діаметр ливників. Як більший діаметр, так і відсутність застигаючого шару, що зростає, в ливниковій системі сприяють відносно малому падінню тиску у формах такого типу.

Серед різноманітних гарячekanальних форм для термочутливих і високов'язких полімерних матеріалів рекомендуються форми із зовнішнім нагріванням колектора й сопла (також відомого як гаряче сопло), оскільки вони забезпечують вільну течію у відкритому каналі, тому що в цьому разі не утворюється застиглий шар полімерного матеріалу.

До недоліків ГКС із зовнішнім нагріванням можна віднести можливість витоку розплаву між соплом і колектором, а також жорсткіші вимоги до кількості, розташування й потужності нагрівників. Матеріал, який витік, може забити колектор і пошкодити нагрівники, дрти й термопари. Крім того, джерело зовнішньої теплоти безпосередньо «конфліктує» із системою

охолодження форми. Отже, сопла ГКС мають бути оточені повітряним простором, який забезпечив би їх ізолювання від матриці. Такий повітряний зазор потребує збільшення об'єму форми, а близькість сопла до формуючої порожнини створює локальні гарячі точки та обмежує розташування ліній охолодження. Також сопла із зовнішнім нагріванням мають більш обмежений контроль за температурою змінного наконечника. Часто використовуються теплопровідні наконечники, які за правильної конструкції можуть мінімізувати вказані проблеми. Наконечник проводить теплоту від нагрітого корпусу сопла. Але температуру змінного наконечника контролюють ті самі нагрівники, що й у сопла. Це обмежує можливості регулювання.

### 8.3. Ізольовані колектори і сопла

ГКС з ізольованими колектором і соплами не має інших джерел теплоти, крім розплаву полімеру, що протікає по ньому. Тому ізольована система має працювати швидко і з регулярними циклами для виключення твердіння розплаву в колекторі й соплах. Зазвичай використовують дуже великий діаметр каналу течії (більше за 30 мм). Перша доза полімерного матеріалу заповнює ливникову систему. Матеріал твердне по периметру холоднішого каналу течії, діючи як термоізоляційний шар (рис. 8.2). У міру продовження циклу лиття нові порції матеріалу проходять крізь застиглі теплоізолювальні шари. Підтримка даного каналу течії відкритим залежить від досить швидкого руху матеріалу крізь нього так, щоб розплав у центрі безперервно перемішувався і не міг повністю затвердіти.

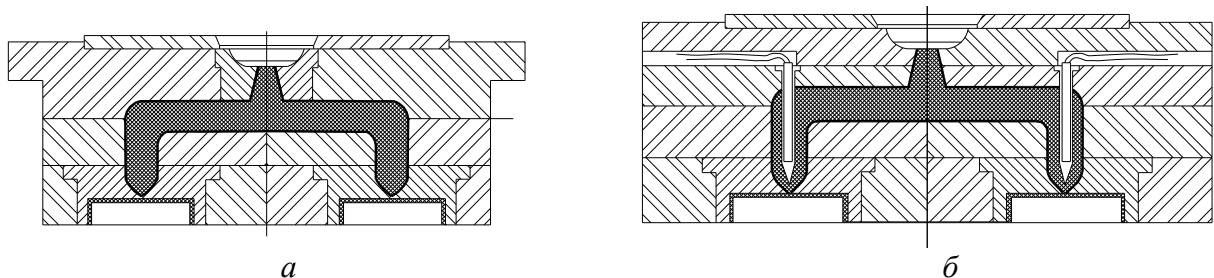


Рис. 8.2. Ізольовані ГКС: *а* – ізольовані колектор і сопло; *б* – ізольований колектор ГКС із соплом з внутрішнім нагрівом

Основними перевагами ізольованої системи перед системами з нагріванням є низька вартість, здатність до швидкої зміни кольору полімеру, мала втрата тиску за рахунок великого діаметра розвідних ливників і те, що вона передає менше теплоти в формуючі порожнини.

Проте такий тип ГКС використовується досить рідко через численні недоліки, пов'язані з неможливістю регулювання температури. Будь-яке порушення або коливання циклу може спричинити значні зміни в течії і стані розплаву, а також повне твердіння ливників. Крім того, такій системі властиве



коливання температури розплаву в поперечному перерізі каналу течії. Все це призводить до того, що використання ГКС зазвичай обмежується виготовленням низькоточних виробів з таких полімерів, як ПЕ, ПП і ПС. Температуру змінних наконечників можна регулювати за допомогою сопел із внутрішнім нагріванням у поєднанні з ізольованим колектором (рис. 8.2,б).

#### 8.4. Колектори із внутрішнім нагріванням

ГКС з внутрішнім нагріванням представляють собою комбінацію двох попередніх схем.

Система із внутрішнім нагріванням складається з компонентів, які нагрівають полімер зсередини за допомогою розподільних каналів і внутрішніх нагрівників, які розташовуються по центру в отворах великого діаметра.

Під час первинного запуску конструкція системи дає змогу мати природний теплоізолювальний бар'єр із затверділого полімеру, який утворюється біля зовнішньої стінки прохідних каналів, що забезпечує значну економію електроенергії. Система надає можливість заощаджувати до 75 % енерговитрат порівняно з ГКС із зовнішнім нагріванням.

Кільця ущільнювачів в цьому випадку не встановлюються, оскільки система є такою, що самоущільнюється. Якщо ізолювальний шар порушується, то ця ділянка заповнюється порцією свіжого полімеру, який створює нове ущільнення без втручання людини. Тому система з внутрішнім нагріванням може експлуатуватися місяцями й навіть роками без додаткового регулювання.

Схему ГКС із внутрішнім нагріванням порівняно зі схемою із зовнішнім нагріванням наведено на рис. 8.3.

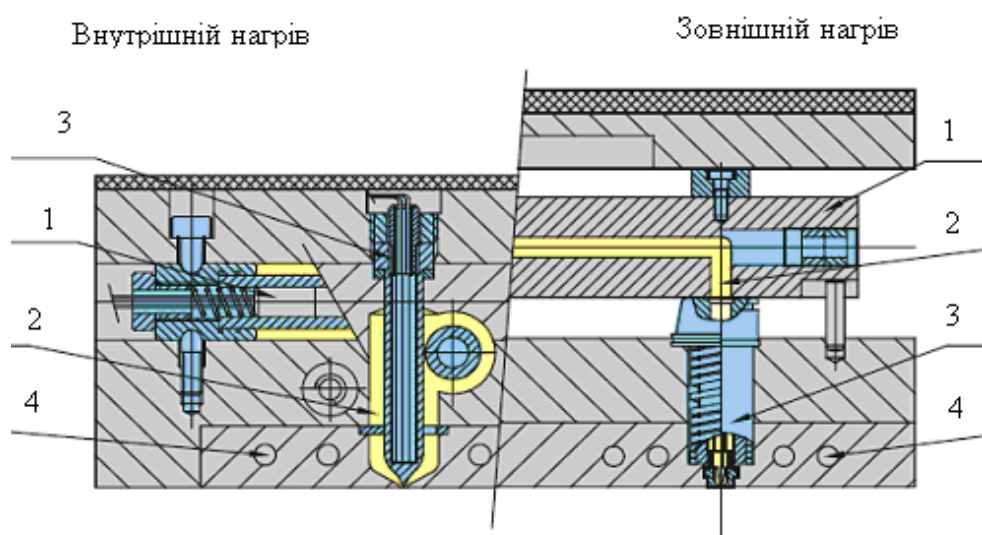


Рис. 8.3. Схеми ГКС з внутрішнім (ліворуч) і зовнішнім (праворуч) нагріванням:  
1 – колектор; 2 – розподільний канал; 3 – сопло; 4 – канал охолодження

Переваги колекторів із внутрішнім нагріванням порівняно з попередніми системами:

- проста монолітна конструкція колектора;
- зниження навантажень на нагрівники;
- зменшення температури поверхні форми;
- ефективна теплоізоляція;
- відсутність теплової деформації;
- повна відсутність протікання;
- швидкий запуск;
- низька енерго- та матеріалоемність.

У той же час колектори із внутрішнім нагріванням мають такі недоліки:

- повільний перехід на інший колір або матеріал;
- погана сумісність з матеріалами, схильними до термічного розкладання.

## **8.5. Сопла ГКС**

Сопла є частиною ГКС, яка доставляє розплав з колектора в формуючу порожнину. Існує декілька основних вимог до гарячих сопел:

- проводити теплоту до впускного ливника, запобігаючи застиганню в місці впускання матеріалу;
- забезпечувати термічне розділення між соплом ГКС і холодною формуючою порожниною;
- забезпечувати чисте розділення розплаву й затверділого виробу з мінімальними слідами від впускних ливників;
- мінімізувати обмеження потоку;
- забезпечувати ефективне регулювання температури розплаву.

### **8.5.1. Сопла із зовнішнім нагрівом і змінними наконечниками**

Змінний наконечник забезпечує можливість змінювання форми впускного отвору (рис. 8.4). Більшість виробників ГКС пропонують стандартизовані змінні наконечники на різьбі. Змінні наконечники мають забезпечувати легкість течії розплаву й регулювання його температури.

За конструктивним виконанням сопла можуть бути прямотечійними, голковими та іншими, з різною конфігурацією та схемою установки залежно від типу перероблюваного матеріалу, маси виробу, режиму лиття, вимог до розташування та охолодження точки впуску розплаву. Приклади конструктивних схем сопел наведено на рис. 8.5.

Сопла, конструкцію яких наведено на рис. 8.5,а, використовують для виробів з високими вимогами до видимості ливника, до швидкої зміни кольору, а також високої інтенсивності охолодження під час перероблення

таких матеріалів, як ПЕ, ПС, АБС, ПММА та ін. (за рекомендаціями фірми ELWIK).

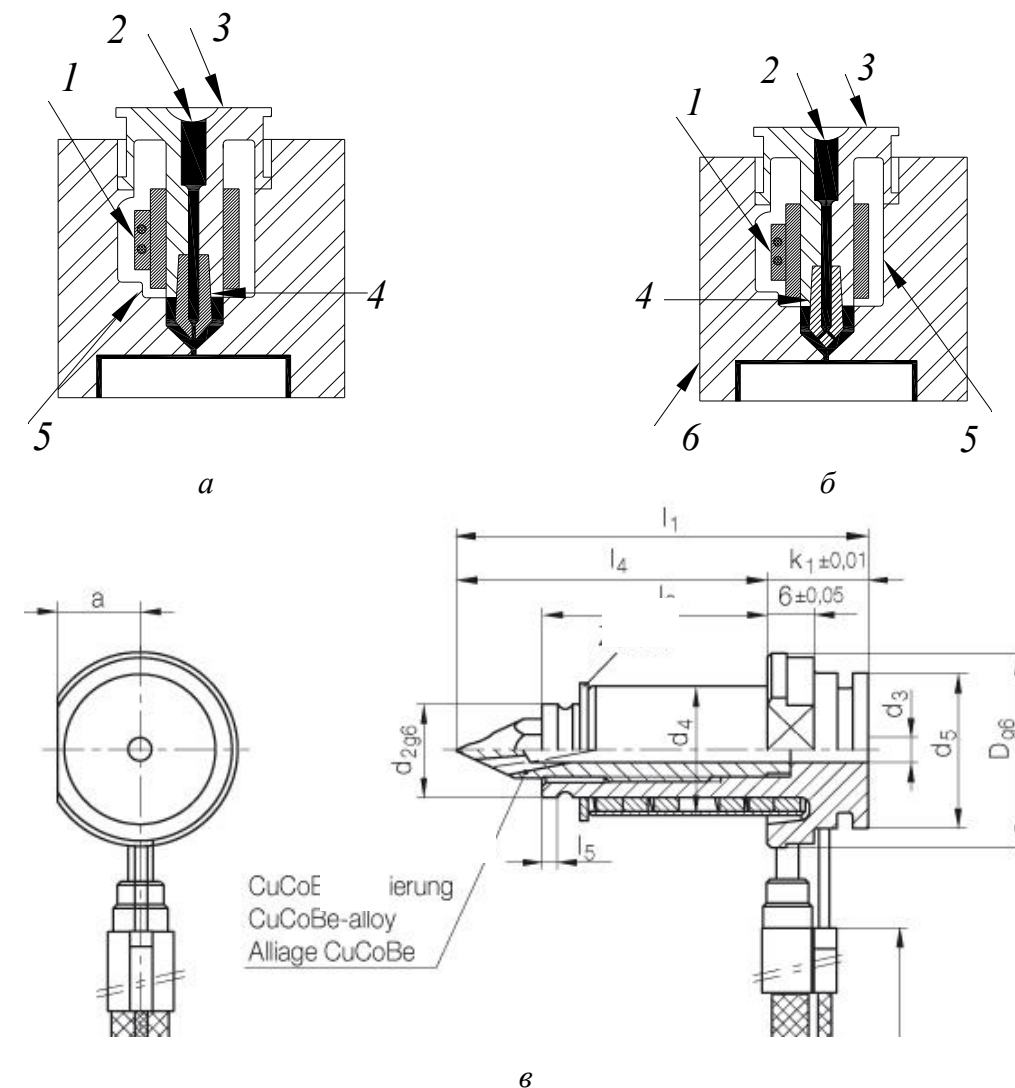


Рис. 8.4. Сопла із зовнішнім нагрівом і змінним наконечником: а – схема із змінним голкоподібним наконечником; б – схема із змінним прямотечійним наконечником; в – варіант конструктивного виконання сопла з прямотечійним наконечником фірми HASCO (1 – стрічковий або спіральний нагрівник; 2 – потік розплаву; 3 – корпус сопла; 4 – змінний наконечник; 5 – ізолюючий повітряний зазор; 6 – плита матриць)

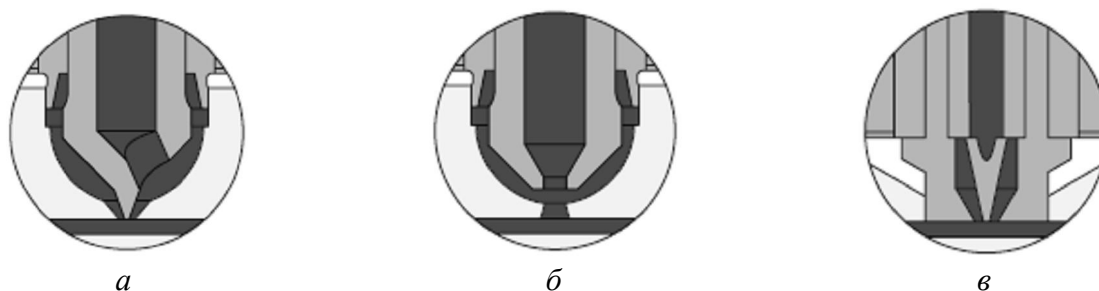


Рис. 8.5. Конструктивні схеми сопел: а – голкове; б – прямотечійне; в – з мініторпедою

Сопла, конструкцію яких наведено на рис. 8.5,б, використовують для виробів з низькими вимогами до видимості ливника, високої інтенсивності охолодження, для аморфних або повільно кристалічних полімерів, які повільно тверднуть, зокрема ПП і ПЕ.

Сопла, конструкцію яких наведено на рис. 8.5,в, використовують для кристалічних полімерів, які тверднуть швидко, зокрема ПА.

Для лиття крупногабаритних виробів використовують упорскування розплаву в декількох точках. Приклад конструкції сопла з декількома впусками показано на рис. 8.6.

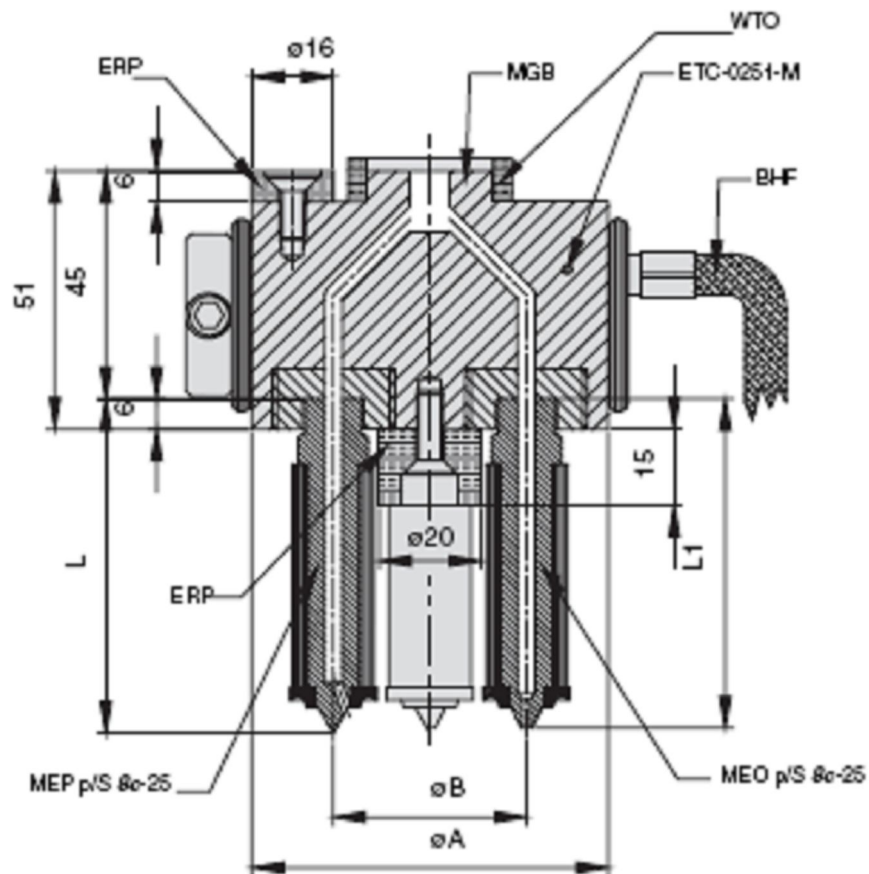


Рис. 8.6. Багатовпускове сопло фірми DME

Подібні сопла застосовують також для одночасного лиття декількох дрібних виробів у багатогніздових формах.

### 8.5.2. Сопла, що закриваються

Існує два основних види сопел, що закриваються: механічні й теплові. Перші можуть бути пружинними, електромагнітними, гідравлічними або пневматичними (рис. 8.7). Основна причина, через яку використовують механічні сопла, що закриваються, – потреба забезпечити бездоганне впускан-

ня, без розбризкування та утворення утяжин. Іншою перевагою цих сопел є можливість використання великих впускних ливників. Це істотно спрощує процес перероблення чутливих до зсуву та армованих волокном матеріалів за високих швидкостей.

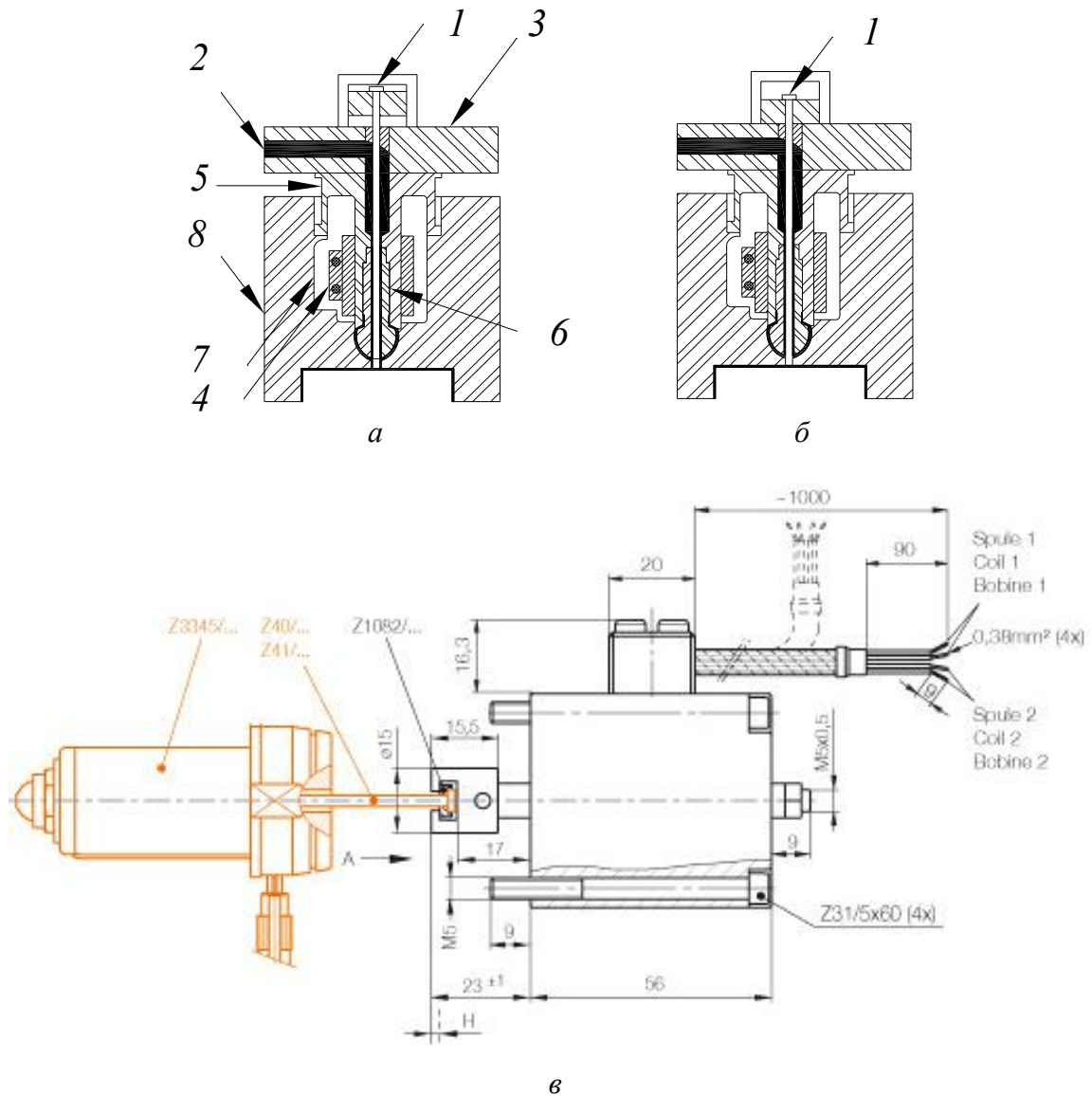


Рис. 8.7. Механічне сопло, що закривається: *a* – схема у відкритому положенні клапана; *б* – схема в закритому положенні клапана; *в* – варіант конструктивного виконання фірми HASCO (1 – клапан; 2 – потік розплаву; 3 – плита колектора; 4 – стрічковий або спіральний нагрівник; 5 – корпус сопла; 6 – змінний наконечник; 7 – ізолювальний повітряний зазор; 8 – плита матриць)

Також сопла, що закриваються, можна використовувати для запобігання зворотному потоку з формуючої порожнини в ливники за умови скидання тиску після заповнення форми. Така зворотна течія може призвести до небажаних значних усадок в місці впускання на виробі.

Варіантом клапанів, що механічно закриваються, є такі, які відкриваються під дією тиску розплаву на їх заплечики, а після заповнення формуючих порожнин та ущільнення виливка вони за допомогою пружини замикають вихідні канали, розташовані в передньому фланці форми. Упорно-центрувальні поясоочки на зовнішній конічній поверхні сопла запобігають руйнуванню тонких стінок його камери сферичною поверхнею сопла, утворюваний повітряний зазор забезпечує теплоізоляцію сопла й матриці, запобігає витіканню розплаву з камери головки сопла в простір між розподільником, переднім фланцем і матрицею, а також взаємно центрує сопло і впускні канали матриці.

Механічні сопла, що закриваються, дуже дорогі в обслуговуванні та ускладнюють установку та експлуатацію форми (більше параметрів контролю). Такі системи також схильні до витоків і браку через взаємодію рухомих частин.

Теплові сопла, що закриваються, мають багато переваг механічних сопел, але при цьому в них відсутні недоліки, притаманні останнім. Такі сопла обладнані невеликим окремим нагрівником змінного наконечника, виконаного з матеріалу з великим коефіцієнтом теплового розширення. Коли наконечник розігрівается, його довжина збільшується, перекриваючи впускний канал. Нагрівник керується таймером, який задає час його вмикання, що дає змогу здійснити заповнення форми й витримку під тиском, і час його вимкнення, достатній для твердіння впускного ливника перед виштовхуванням виробу. Під час використання теплових сопел, що закриваються, потрібно забезпечити ефективне охолодження ливника, щоб гарантувати твердіння розплаву.

Теплові сопла, що закриваються, забезпечують точніше управління температурою змінного наконечника. За рахунок цього охолоджувальні канали можуть бути розташовані дуже близько до місця впускання без ризику передчасного твердіння ливника. Нагрівник наконечника також дає змогу використовувати дуже невеликі впускні ливники, які інакше могли би затверднути.

### **8.5.3. Теплопровідні сопла**

Теплопровідні сопла не нагріваються власними нагрівниками, а сприймають теплоту від колектора ГКС. Для цього використовують втулки, виконані з матеріалу з високою теплопровідністю, зазвичай берилієвої бронзи. Втулка конструюється в такий спосіб, щоб полімер заповнював та оточував сопло після перших впорскувань. Оточуючий матеріал залишається як ізолювальний шар, забезпечуючи малу втрату теплоти у форму. Така конструкція забезпечує круглий канал течії з нагрівом від втулки. Перевагами використання сопел такого типу є їх відносна дешевизна (не потрібні нагрівники й регулятори), а також невеликий розмір. Головне обмеження –

неможливість регулювати температуру під час передачі теплоти від колектора ГКС. Крім того, довжина сопел обмежена, оскільки теплота має передаватися вздовж всієї їхньої довжини до місця впускання. Додатковим недоліком є можливе розкладання полімерного матеріалу, що оточує втулку. Більш того, втулка з берилієвої бронзи, яка зазвичай використовується для передачі теплоти, не повинна контактувати з ПП або ПА, оскільки може відбутися небажана хімічна реакція. Для захисту втулки можна використовувати нікелеве покриття, хоча воно схильне до інтенсивного зношування.

## 9. КОНСТРУЮВАННЯ ФОРМУЮЧИХ ДЕТАЛЕЙ І СИСТЕМ ТЕРМОСТАТУВАННЯ

### 9.1. Загальні положення

Принципових відмінностей від конструювання матриць і пуансонів форм для пресування немає, проте до оформлення стиків між формуючими деталями висуваються вищі вимоги. Їх потрібно розташовувати на природних переходах поверхонь, щоб не залишалося слідів. Кромки стиків мають точно збігатися по висоті і сполучатися без завалів. Для цього їх полірують разом до  $Ra\ 0,016...0,020$ .

Пуансони й матриці поділяють на суцільні (рис. 9.1, 9.2) і складені. Суцільні менш надійні в експлуатації через знос з часом і дорожчі, але міцніші й стійкіші у своєму положенні відносно інших деталей. У них можуть застосовувати локальні вставки для рельєфних поверхонь.

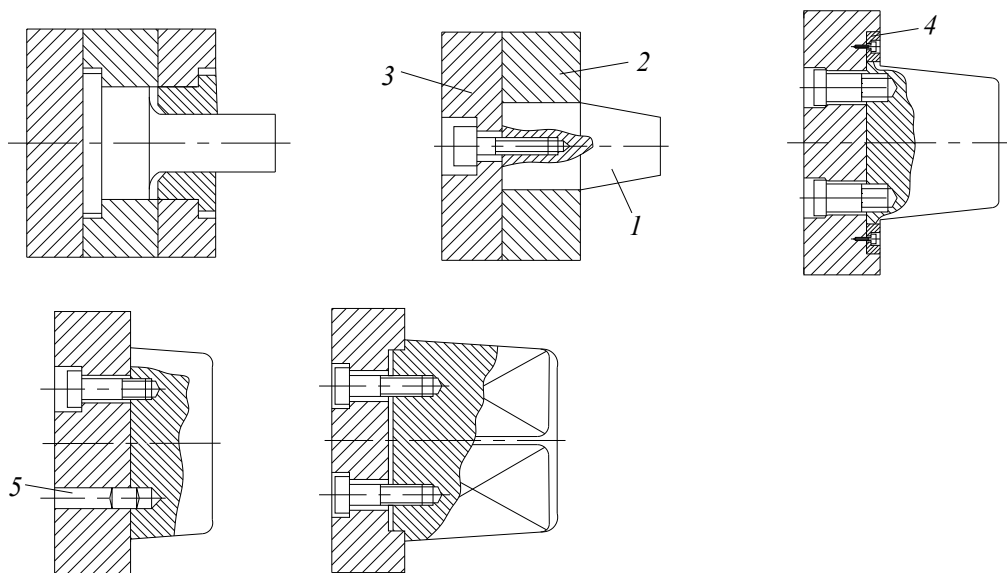


Рис. 9.1. Приклади конструкцій і способів кріплення суцільних пуансонів форм:  
1 – пуансон, 2 – плита пуансонотримача, 3 – опорна плита, 4 – кільце, 5 – штифт

Складені формуючі деталі застосовуються для формування виробів з піднутреннями, високими ребрами і глибокими пазами. Місця стиків формуючих деталей мають бути герметичними і не відокремлюватися під дією тиску. Формуючі деталі розраховують на допуски і значення виконавчих розмірів формуючої поверхні, на міцність і деформацію під дією тиску впорскування [5].

Розглянемо приклад розрахунку деформації суцільних циліндричних матриці і пуансона від дії тиску лиття  $P$  (рис. 9.3).



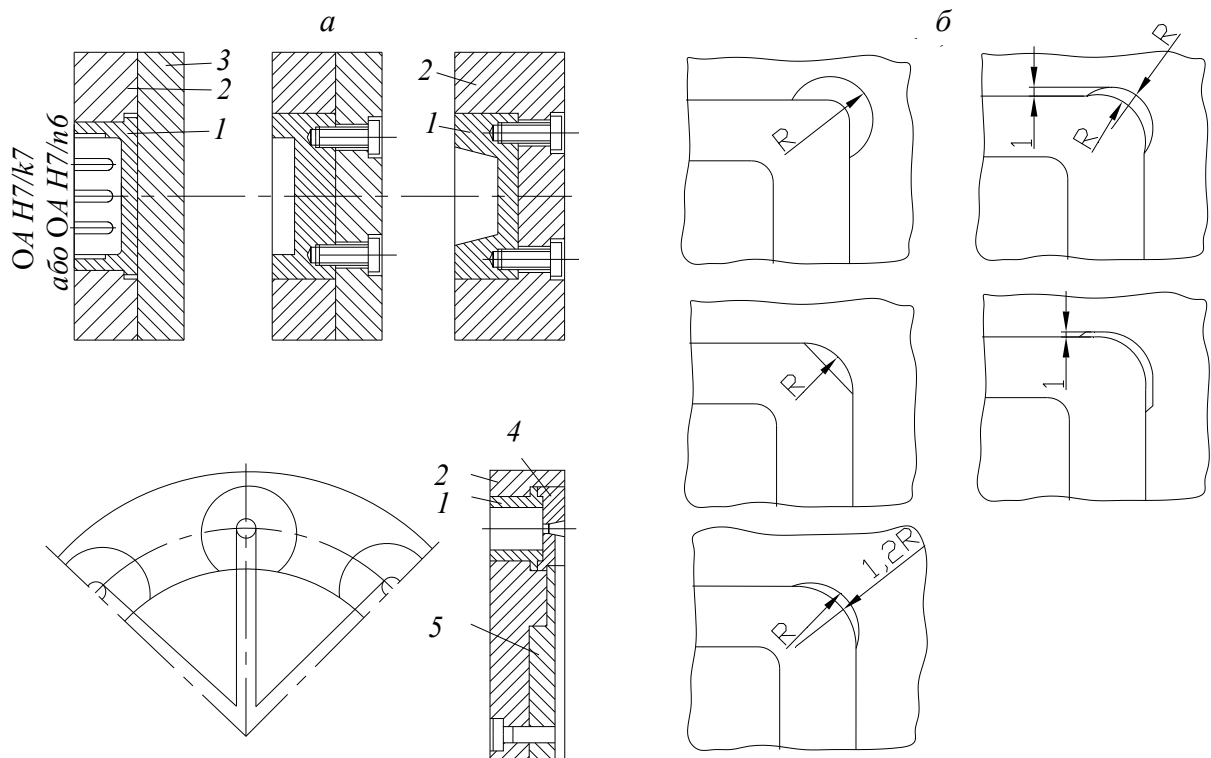


Рис. 9.2. Приклади способів кріплення (а) і з'єднання з обоймою (б) суцільних матриць:  
1 – матриця, 2 – обойма матриць, 3 – опорна плита, 4, 5 – вставки

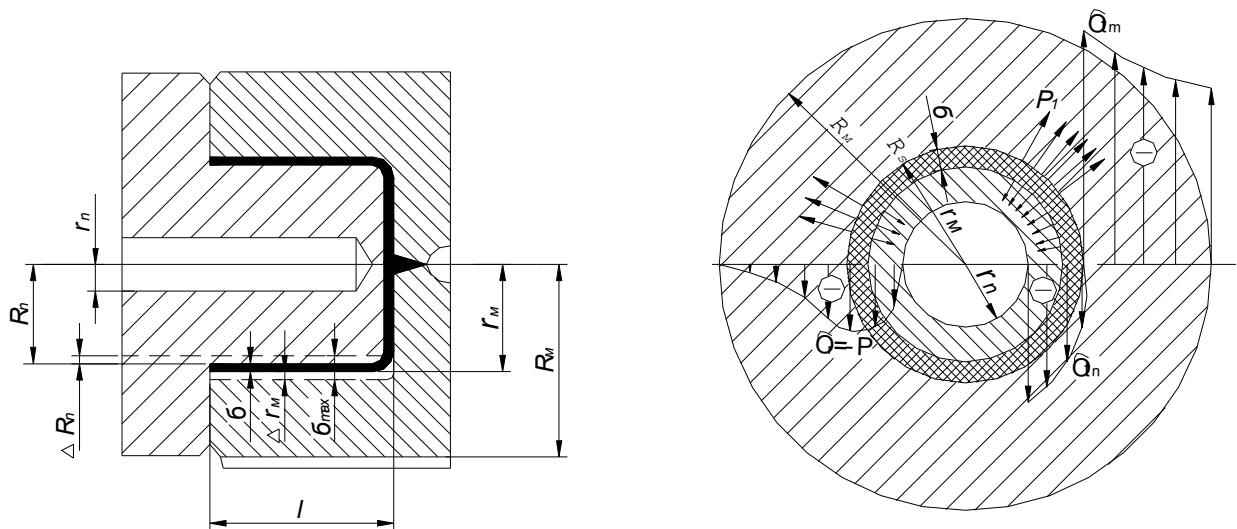


Рис. 9.3. Схема до розрахунку матриці і пуансона

Товщина формуючої кільцевої порожнини до й після деформації:

$$\delta = r_m - R_{\text{п}};$$

$$\delta_{\text{max}} = \delta + \Delta r_m + \Delta R_{\text{п}}.$$

Запишемо тангенціальні напруження для пуансона й матриці за формулами Ляме:

$$\sigma_{\pi} = P \frac{R_{\pi}^2 + r_{\pi}^2}{R_{\pi}^2 - r_{\pi}^2};$$

$$\sigma_{\text{тм}} = P \frac{R_{\text{м}}^2 + r_{\text{м}}^2}{R_{\text{м}}^2 - r_{\text{м}}^2}.$$

Відповідно до закону Гука визначимо тангенціальні деформації:

$$\varepsilon_{\pi} = \frac{\Delta R_{\pi}}{R_{\pi}} = \frac{1}{E} (\sigma_{\pi} - \mu P); \quad (9.1)$$

$$\varepsilon_{\text{тм}} = \frac{\Delta r_{\text{м}}}{r_{\text{м}}} = \frac{1}{E} (\sigma_{\text{тм}} - \mu P), \quad (9.2)$$

де  $E$  – модуль пружності під час розтягу для матеріалу пуансона і матриці,  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

У результаті спільного розв'язку залежностей (9.1) і (9.2), отримуємо радіальні деформації матриці та пуансона:

$$\Delta R_{\pi} = \frac{R_{\pi} P}{E} \left( \frac{R_{\pi}^2 + r_{\pi}^2}{R_{\pi}^2 - r_{\pi}^2} - \mu \right);$$

$$\Delta r_{\text{м}} = \frac{r_{\text{м}} P}{E} \left( \frac{R_{\text{м}}^2 + r_{\text{м}}^2}{R_{\text{м}}^2 - r_{\text{м}}^2} + \mu \right).$$

## 9.2. Системи термостатування форм для лиття під тиском

Завданням системи термостатування є забезпечення однорідності температурного поля за максимальної інтенсивності охолодження.

Як холодоагент за температури до 80 °С використовують здебільшого воду, а за більшої температури – олію веретенну («індустріальне – 20»), силіконове мастило або етиленгліколь.

Для охолодження плоских виробів застосовують плити з каналами, розташованими навколо формуючих гнізд (див. рис. 9.4, 9.5).

Для охолодження круглих виробів у матрицях або їхніх обоймах розташовують канали у вигляді спіралей або кілець. У пуансонах, якщо дозволяють їхні розміри, виконують пальцьові канали або порожнини з турбулізуючими вставками (рис. 9.6–9.8).

У багатогніздових формах канали охолодження розташовують паралельно або послідовно (рис. 9.9). Важливо забезпечити рівномірність температурного поля на всій поверхні виробу. Для виробів, до яких висуваються високі вимоги, перепад температури не повинен перевищувати 1–2 °С, а для невідповідальних виробів – до 10 °С. Найчастіше перепад температури не повинен перевищувати 5 °С.

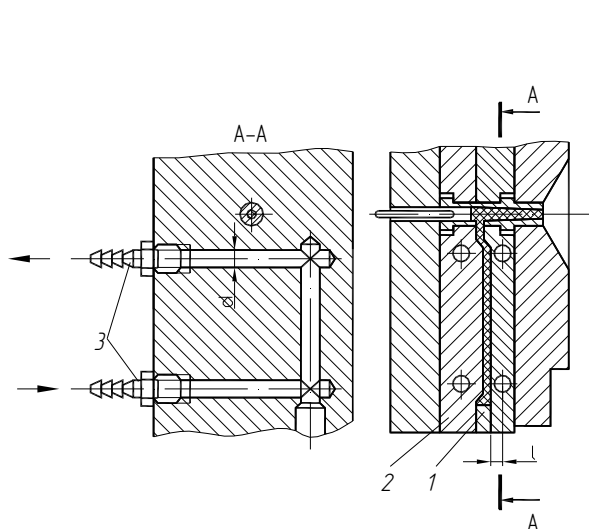


Рис. 9.4. Конструкція каналного охолодження форми для плоских виробів:  
1 – нерухома півформа; 2 – рухома півформа;  
3 – штуцера

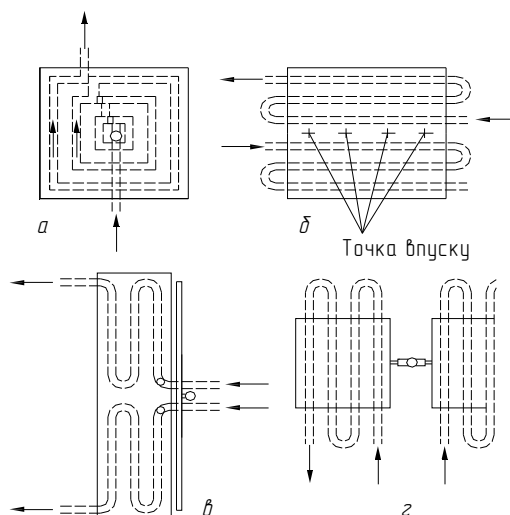


Рис. 9.5. Варіанти розташування каналів охолодження у формах для плоских виробів: а – з центральним ливником; б – з точковими впусками в багатогніздовій формі; в – з боковим щілинним впуском; г – з боковим точковим впуском

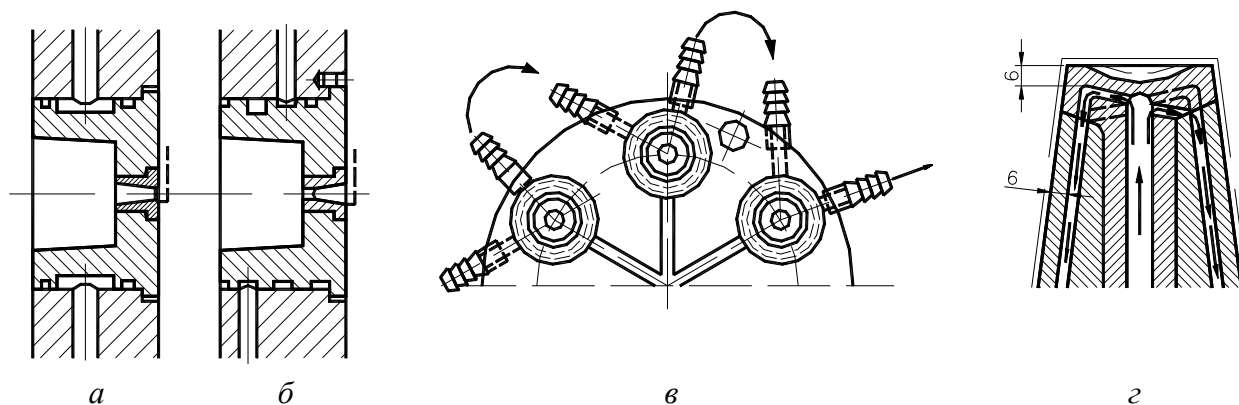


Рис. 9.6. Варіанти розташування каналів охолодження в матрицях і складеному пуансоні:  
а – кільцевий канал; б – гвинтовий канал; в – схема послідовного розташування гнізд;  
г – охолодження складеного пуансона

Охолоджувальні канали для уникнення перегріву мають проходити якомога ближче до формуючої порожнини, особливо вони потрібні в глибоких порожнинах і в місцях, куди розплав потрапляє з максимальною швидкістю.

Необхідно уникати перетину каналів охолодження з виштовхувачами, колонками й ливниковою системою.

Зазвичай діаметр каналів становить 6–10 мм, а перепад температури холодоагенту – 2–3 °С.

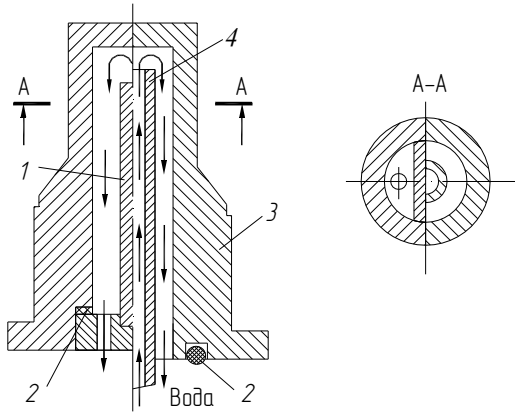


Рис. 9.7. Конструктивна схема охолодження довгих і тонких пуансонів (ліворуч – з перегородкою в отворі, праворуч – з трубкою): 1 – перегородка; 2 – ущільнення; 3 – пуансон; 4 – трубка

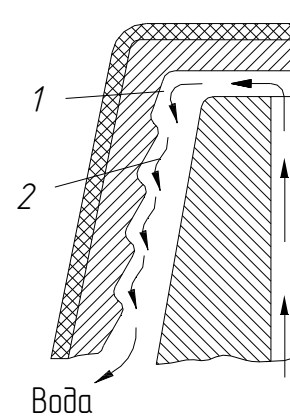


Рис. 9.8. Конструктивна схема охолодження складеного пуансона з турбулізацією потоку холодоагенту: 1 – поверхня з нарізкою; 2 – ребро

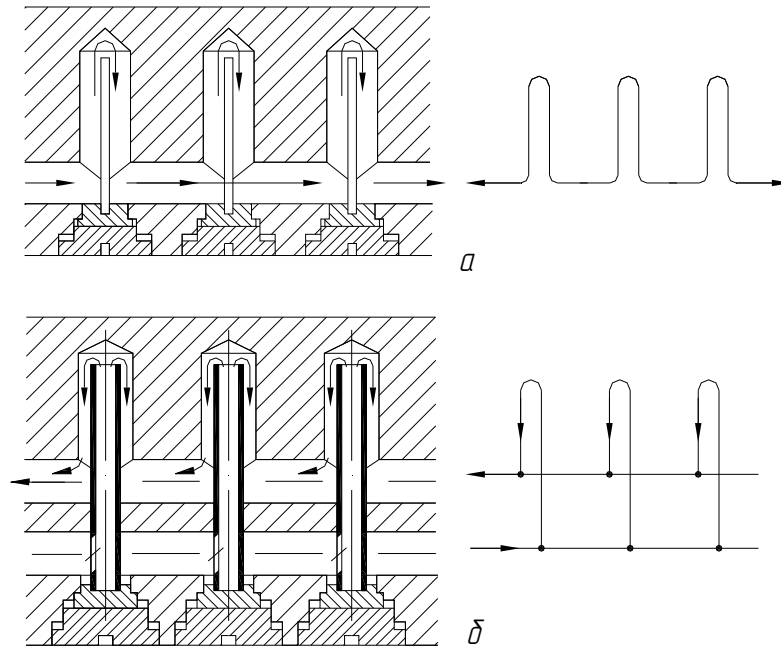


Рис. 9.9. Схеми з'єднання каналів охолодження в пуансонах багатогніздових форм: а – послідовне; б – паралельне

Відстань від каналу до порожнини форми беруть рівною діаметру каналу, а відстань між каналами – один-півтора діаметра.

Занадто великий переріз каналів призводить до збільшення витрати холодоагенту та ослабленню деталей форми, а занадто малий – до недостатнього охолодження. Переріз охолоджувальних каналів має бути не більшим за переріз підвідних каналів для забезпечення правильного режиму течії й теплообміну.

### 9.3. Розрахунок системи термостатування литтєвих форм

Система термостатування має забезпечувати рівномірне охолодження розплаву до температури вилучення виробу з форми.

Час охолодження виробу становить, с [33]

$$\tau_{\text{ох}} = \frac{0,405}{a} \cdot \left( \frac{\delta}{2} \right)^2 \cdot \left( \ln 1,27 - \ln \frac{t - t_{\phi}}{t_p - t_{\phi}} \right),$$

де  $\delta$  – максимальна товщина стінки виробу, м;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності розплаву,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $t_{\phi}$  – середня температура форми, зазвичай  $50 \dots 70$  °C;  $t_p$  – температура розплаву;  $t$  – температура виробу під час розкриття форми, °C.

Температура виробу під час розкриття форми

$$t = t_{\phi} + (10 \dots 25).$$

Час циклу

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{ох}} + 2\tau_{\text{с}} + \tau_{\text{впр}},$$

де  $\tau_{\text{с}}$  – час змикання або розмикання півформ;  $\tau_{\text{впр}}$  – час упорскування.

Час упорскування

$$\tau_{\text{впр}} = \frac{V_o}{v_{\text{впр}}},$$

де  $V_o$  – об'єм виливка,  $\text{м}^3$ ;  $v_{\text{впр}}$  – номінальна швидкість упорскування термопластавтомата,  $\text{м}/\text{с}$ .

Кількість теплоти, що надійшла з розплавом, Дж

$$Q_0 = m_0 C_0 (t_p - t_k),$$

де  $m_0$  – маса виливка, кг;  $C_0$  – теплоємність розплаву, Дж/(кг K);  $t_k$  – середня температура розплаву за час охолодження, °C:

$$t_k = t_{\phi} + \frac{2(t - t_{\phi})}{\pi}.$$

Кількість теплоти, що відводиться холодоагентом, має відповідати кількості теплоти, що надійшла з розплавом, за винятком теплових втрат:

$$Q_x = Q_0 - Q_{\text{втр}}.$$

У теплових розрахунках литтєвих форм теплообміном з навколишнім середовищем у більшості випадків можна знехтувати

$$Q_x \approx Q_0.$$

Масова витрата холодоагенту,  $\text{кг}/\text{с}$

$$g_x = \frac{Q_x}{C_x \Delta t_x},$$

де  $C_x$  – масова теплоємність холодоагенту (для води  $C_x = 4,18 \cdot 10^3$  Дж/(кг·°C));  $\Delta t_x = 2 \dots 4$  °C – різниця температури холодоагенту на виході з каналу та вході в канал.

Масова витрата холодоагенту в пуансоні, кг/с

$$g_x^{\pi} = g_x \frac{F_{\pi}}{F_0}.$$

Масова витрата холодоагенту в матриці, кг/с

$$g_x^{\text{м}} = g_x \frac{F_{\text{м}}}{F_0},$$

де  $F_0$  – сумарна площа оформлювальної поверхні виливка,  $\text{м}^2$ ;  $F_{\pi}$  – площа оформлювальної поверхні пуансона,  $\text{м}^2$ ;  $F_{\text{м}}$  – площа оформлювальної поверхні матриці,  $\text{м}^2$ .

Площа поперечного перерізу каналів пуансона й матриці:

$$f_{\text{к}}^{\pi} = \frac{g_x^{\pi}}{\rho_x \tau_{\text{ц}} w};$$

$$f_{\text{к}}^{\text{м}} = \frac{g_x^{\text{м}}}{\rho_x \tau_{\text{ц}} w},$$

де  $\rho_x$  – густина холодоагенту,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $w$  – швидкість течії холодоагенту в каналах охолодження, з умов оптимального режиму течії і теплообміну беруть  $w = 0,5 \dots 1,0$  м/с.

Діаметр каналів охолодження, м

$$d_{\text{к}}^{\pi} = \sqrt{\frac{4}{\pi} f_{\text{к}}^{\pi}};$$

$$d_{\text{к}}^{\text{м}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} f_{\text{к}}^{\text{м}}}.$$

Довжина каналів охолодження, м

$$l_{\text{к}}^{\pi} = \frac{F_{\pi}}{\pi d_{\text{к}}^{\pi}};$$

$$l_{\text{к}}^{\text{м}} = \frac{F_{\text{м}}}{\pi d_{\text{к}}^{\text{м}}}.$$

## 10. ДЕФЕКТИ ЛИТТЄВИХ ВИРОБІВ І СПОСОБИ ЇХ УСУНЕННЯ

Під час лиття під тиском унаслідок некоректного проектування або виготовлення литтєвих форм, а також відхилення від технологічного процесу в одержуваних виробах можливе виникнення певних дефектів. Розглянемо основні з них.

### 10.1. Недолив, неповне впорскування

Схему недоливу (неповного впорскування) наведено на рис. 10.1.

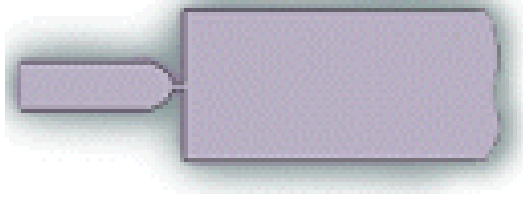


Рис. 10.1. Схема недоливу (неповного впорскування)

Причинами недоливу можуть бути:

- остигання матеріалу через низьку швидкість уприскування;
- низька температура розплаву;
- низька температура форми;
- передчасне перемикання машини на витримку під тиском;
- зниження товщини виробу або неправильний вибір місць впуску, або низька текучість матеріалу;
- знижена товщина ливникових каналів;
- ефект уповільнення течії;
- замикання повітря («повітряна пастка»);
- брак (нестача) матеріалу в циліндрі через неправильно встановлену дозу.

Остигання матеріалу через низьку швидкість уприскування відбувається внаслідок недостатнього дисипативного тепловиділення в розплаві, щоб компенсувати втрати теплоти крізь формоутворювальні поверхні. Охолодження розплаву призводить до недоливу.

У разі перемикання машини на витримку під тиском за неповністю заповненої форми швидкість впорскування падає, що призводить до зниження температури фронту розплаву. Якщо ця температура менше від температури, за якої розплав втрачає текучість, спостерігається недолив. Проблема можна вирішити зменшенням втрат тиску під час упорскування (збільшити товщину виробу та/або літників, застосувати гарячий канал, використовувати більш те-

кучу марку матеріалу) або за умови використання литтєвої машини з великим тиском упорскування.

Ефект уповільнення проявляється у виробках, що мають тонкі ребра, бобишки, локальні ділянки зниженої товщини біля місця впуску. Їх наявність спричинює різке охолодження фронту розплаву і часто призводить до недоливу тонких областей, розташованих біля впуску. Після потрапляння розплаву в розгалуження каналу на товстий і тонкий, розплав починає охолоджуватися швидше в тонкій стінці, сповільнюючи течію. Зниження швидкості течії призводить до зменшення тепловиділення в розплаві від тертя. Температура фронту розплаву в тонкій частині потоку починає швидко знижуватися, у результаті чого фронту розплаву застигає. Підвищення тиску розплаву в кінці стадії впорскування не дозволяє усунути недолив, оскільки пробка з холодного полімеру, що утворилася в тонкому каналі, перешкоджає течії розплаву.

## 10.2. Облоя

Схему облою наведено на рис. 10.2.

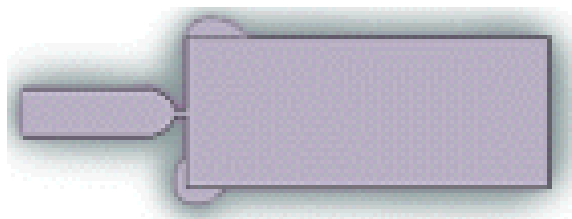


Рис. 10.2. Схема облою

Можливі причини облою:

- недостатнє зусилля замикання литтєвої машини;
- великі деформації плит прес-форми внаслідок високого тиску на стадії впорскування;
- перекіс форми;
- недопустимий знос форми.

У разі появи облою внаслідок недостатнього зусилля замикання необхідно або знизити розпірне зусилля, або використовувати литтєву машину з великим зусиллям замикання.

Для зменшення розпірного зусилля під час упорскування рекомендується:

- збільшити температуру розплаву;
- збільшити температуру форми;
- використовувати більш текучий матеріал.



### 10.3. Видима лінія спаю

Схему видимої лінії спаю наведено на рис. 10.3.

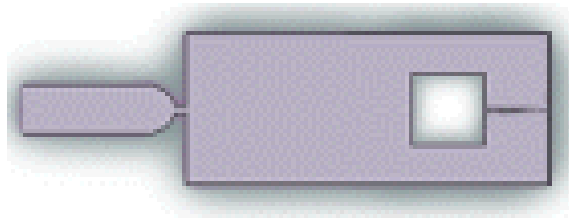


Рис. 10.3. Схема видимої лінії спаю

Спай виникає в разі стикування двох потоків розплаву. Утворена при цьому повітряна канавка на поверхні виробу – видима лінія спаю – може погіршувати зовнішній вигляд виробу.

Зазвичай області спаю мають меншу міцність, ніж інші області виробу. Зниження міцності пов'язують з низкою факторів і в першу чергу з порушенням в області спаю структури і зміною молекулярної орієнтації матеріалу. Повітряна канавка є концентратором напружень і для аморфних матеріалів зазвичай з неї зазвичай починається руйнування виробу. Для полімерних матеріалів, які кристалізуються, виріб часто руйнується поблизу спаю.

Фактори, що сприяють усуненню проблеми:

- Підвищення товщини виробу;
- Підвищення температури розплаву в області спаю;
- Підвищення температури форми;
- Використання матеріалу виробу з підвищеною текучістю;
- Підвищення тиску витримки.

### 10.4. Повітряна пастка, замикання повітря

Схему повітряної пастки (замикання повітря) наведено на рис. 10.4.

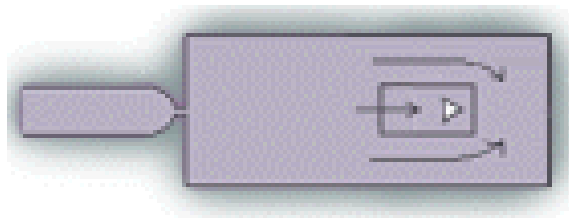


Рис. 10.4. Схема повітряної пастки (замикання повітря)

Повітряні пастки утворюються в разі замикання повітря в порожнині форми за відсутньої або поганої її вентиляції. Повітряні пастки також можуть виникати внаслідок прискореної течії розплаву по більш товстим ділянкам ви-

робу. Якщо в місці замикання повітря вентиляція вже існує, для кращого витіснення повітря з порожнини можна знизити швидкість упорскування в кінці процесу заповнення форми, а також збільшити поперечний переріз її вентиляційних каналів.

Стрімке стиснення повітря в порожнині форми за відсутньої або поганої вентиляції може привести до підвищення температури до 500–600 °С і обвуглювання полімеру в області повітряної пастки.

### 10.5. Темні включення, підгари повітря

Схему темних включень (підгарів повітря) наведено на рис. 10.5.



Рис. 10.5. Схема темних включень (підгарів повітря)

Темні включення виникають унаслідок деструкції та обвуглювання полімеру через його перегрів у матеріальному циліндрі внаслідок високого вмісту вторинного матеріалу, наявності в циліндрі залишків попереднього матеріалу, а також у разі потрапляння сторонніх домішок.

Перегрів полімеру в матеріальному циліндрі може відбуватися з таких причин:

- у разі замикання повітря в порожнині форми;
- внаслідок високого вмісту вторинного матеріалу;
- через перегрів полімеру в матеріальному циліндрі або ливниковій системі;
- за великої «подушки», тобто залишку матеріалу в передній частині циліндра після закінчення витримки під тиском (розмір подушка матеріалу не повинен перевищувати 5–7 мм);
- через тривале перебування за високої температури, наприклад, якщо об'єм виливки набагато менше за максимальний об'єм упорскування;
- через високу частоту обертання шнека під час набору дози (за високої частоті обертання шнека внаслідок дисипативного тепловиділення розплав може розігріватися на 30–35 °С);
- у результаті зупинок процесу.

У холодноканальному літнику перегрів матеріалу може бути наслідком високої швидкості упорскування або малої товщини ливникових каналів (особливо впускного ливника).

Застійні зони можуть виникати в соплі і в гарячеканальній ливниковій

системі при помилках конструкції й дефектах виготовлення. Матеріал, що залишається в застійних зонах, розкладається за тривалого впливу високих температур.

## 10.6. Струминне заповнення

Схему струминного заповнення наведено на рис. 10.6.

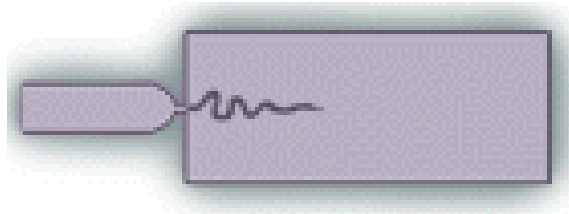


Рис. 10.6. Схема струминного заповнення

Нестійке заповнення форми є наслідком високоеластичної поведінки розплаву. Цей ефект проявляється за високих швидкостей упорскування, малого поперечний переріз впускного ливника або високої в'язкості розплаву.

Іншими проявами високоеластичної поведінки розплаву можуть бути матові або мутні плями біля впуску.

Для усунення цього дефекту рекомендується:

- значно зменшити швидкість упорскування при проходженні розплавом впускного ливника;
- збільшити поперечний переріз впускного ливника та зменшити його довжину;
- збільшити температури розплаву й форми;
- згладити область переходу від розвідного до впускного ливника і позбутися «мертвих зон»;
- застосувати матеріал з більшою текучістю;
- використовувати впуск у приплив.

## 10.7. Сріблясті лінії або розводи на поверхні

Схему сріблястих ліній або розводів на поверхні наведено на рис. 10.7.

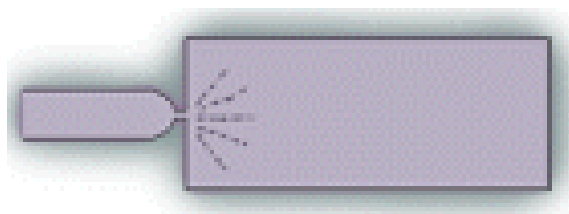


Рис. 10.7. Схема сріблястих ліній або розводів на поверхні

Сріблясті або сірі штрихи, лінії або розводи (окремі, або серії, які радіально розходяться від місця впуску) можуть з'являтися з таких причин:

- висока вологість матеріалу (недостатній ступінь осушування);
- високі швидкості зсуву й напруження зсуву, що спричиняють механічну деструкцію матеріалу;
- перегрів матеріалу.

Часто цей дефект поєднується із струминним заповненням.

Якщо причиною дефекту є високі швидкості або напруження зсуву, рекомендується:

- зменшити швидкість упорскування;
- збільшити температуру розплаву;
- збільшити поперечний переріз впускного ливника;
- використовувати матеріал з більшою текучістю.

### 10.8. Ефект «мармуру»

Схему ефекту «мармуру» наведено на рис. 10.8.

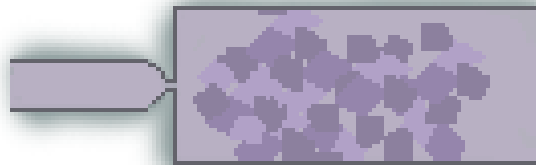


Рис. 10.8. Схема ефекту «мармуру»

Причиною виникнення ефекту «мармуру» може бути зсув поверхневого шару під дією високих швидкостей зсуву.

Для усунення цього ефекту рекомендується:

- зменшити швидкість уприскування;
- змінити профіль швидкості уприскування;
- збільшити перетин впускного ливника;
- округлити гострі кромки виробу.

### 10.9. Газові бульбашки

Схему газових бульбашок наведено на рис. 10.9.



Рис. 10.9. Схема газових бульбашок

Бульбашки всередині виробу можуть утворюватися з таких причин:

- неякісна пластикація матеріалу (низький протитиск);
- потрапляння повітря в матеріальний циліндр;
- підвищений вміст води й летких компонентів у матеріалі;
- великий вміст вторинного матеріалу;
- перегрів полімеру в матеріальному циліндрі або ливниковій системі;
- захоплення повітря через високу швидкість упресування.

### 10.10. Газові бульбашки

Схему газових бульбашок наведено на рис. 10.10.

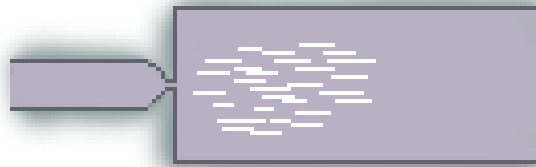


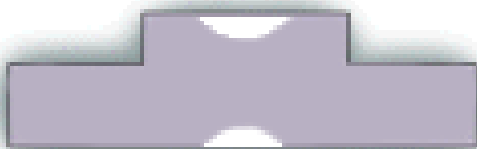
Рис. 10.10. Схема дефекту

Голчасті повітряні включення можуть бути результатом недостатнього ущільнення полімеру під час пластикації. Для усунення цього дефекту рекомендується збільшити протитиск.

Причиною появи великих зон з волосяними повітряними включеннями може бути велика доза впресування (якщо хід шнека перевищує чотири діаметра шнека).

### 10.11. Утяжини (утяжки), внутрішні усадкові порожнини

Схему утяжин (утяжки) і внутрішніх усадкових порожнин наведено на рис. 10.11.



а



б

Рис. 10.11. Схеми дефектів: а – утяжина, б – раковина

Утяжини – заглибина на поверхні виробу навпроти ребер (бобишек) і в товстостінних частинах – виникають через недостатнє ущільнення матеріалу на стадії витримки під тиском.

Якщо товщина шару полімеру в місці приєднання ребра або бобишки більше за товщину сусідніх ділянок, то це місце охолоджується повільніше, що призводить до підвищеної об'ємної усадки матеріалу в місці приєднання.

Якщо товстостінні ділянки заповнюються розплавом через більш тонкі, швидке застигання тонких областей перешкоджає доброму ущільненню товстостінних ділянок.

Для усунення утяжек потрібно поліпшити ущільнення матеріалу такими методами:

- збільшити тиск витримки і час витримки під тиском;
- збільшити поперечний переріз ливникових каналів;
- підвищити температуру розплаву;
- поліпшити охолодження області з утяжками;
- зменшити інтенсивність охолодження області між впуском і товстостінною ділянкою;
- підвищити швидкість упорскування;
- перенести (додати) місця впуску в найтовстіші частини виробу або наблизити місця впуску до найтовщих частин виробу;
- підвищити товщину виробу на ділянках від місця впуску до товстостінних ділянок;
- зменшити товщину ребер і товстих ділянок;
- використовувати матеріал з більшою текучістю.

Для усунення утяжек навпроти ребер і бобишек також можна застосовувати спеціальні конструкції (канавки вздовж ребра або навколо бобишки, заглиблення знака, формуючого отвір бобишки і т.д.), що зменшують товщину шару полімеру.

## 10.12. Викривлення

Схему викривлення наведено на рис. 10.12.



Рис. .12. Схема викривлення

Викривлення – це спотворення форми виробу. Загальною причиною викривлення є нерівномірність усадкових деформацій (усадок) по виробу. Причинами нерівномірності усадок можуть бути:

- незбалансоване заповнення форми розплавом;
- зниження температури розплаву під час упорскування;
- нестійке заповнення форми;

- нерівномірна орієнтація полімеру та анізотропного наповнювача (скловолокно, вуглеволокно);
- нерівномірне охолодження виробу (наприклад, за різниці температур матриці й пуансона);
- нерівномірне ущільнення виробу.

На рівномірність усадок значно впливають товщина виробу, особливості конструкції виробу й ливникової системи, особливості матеріалу, технологічний режим та інші чинники.

### 10.13. Розтріскування

Схему розтріскування наведено на рис. 10.13.

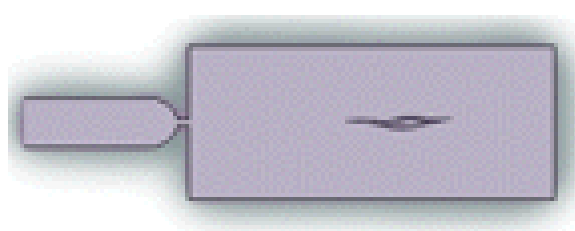


Рис. 10.13. Схема розтріскування

Причиною появи тріщин на поверхні виробу є високий рівень залишкових напружень.

Типові причини залишкових напружень:

- нерівномірність усадкових процесів по товщині й довжині виробу;
- низька температура форми;
- низька температура розплаву;
- висока швидкість упорскування;
- нестійке заповнення;
- нерівномірний розподіл наповнювача по виробу;
- мала товщина шару полімеру під час лиття з металевою арматурою тощо.

Арматура перешкоджає вільній усадці й за недостатньої товщини шару полімеру може відбуватися його розтріскування. Мінімальна товщина шару полімеру навколо арматури коливається від 0,5 до 5,0 мм і вибирається з урахуванням розміру арматури, її конструкції, а також фізико-механічних характеристик полімеру. Невелика товщина шару полімеру можлива за умови використання матеріалів з малими значеннями усадок і невеликим коефіцієнтом лінійного розширення.

## **11. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ КОНСТРУЮВАННЯ ЕКСТРУЗІЙНИХ ГОЛОВОК**

### **11.1. Класифікація екструзійних головок**

Екструзійні головки класифікують за такими ознаками:

1. За напрямом виходу виробу:

- прямотечійні, у яких напрям виходу розплаву збігається з віссю черв'яка;
- кутові, частіше за все напрям виходу розплаву в них повернуто на  $90^\circ$  відносно осі черв'яка;

- офсетні, які є різновидом кутових і в яких здійснюється подвійний поворот, унаслідок чого виріб формується в напрямі, паралельному осі екструдера. Такі головки можуть застосовуватися для багатострумнинної екструзії, для виготовлення певних видів кабелів або профілів з осердям.

2. За конфігурацією формуючої щілини:

- плоскощілинні;
- кільцеві;
- гранулювальні;
- профільні.

3. За призначенням:

1) головки для грануляції:

- а) для гарячої грануляції, або грануляції на решітці;
- б) для холодної грануляції, або стренгової грануляції;

2) головки для рукавної плівки:

- а) для одношарових плівок;
- б) для багатошарових плівок;

3) плоскощілинні головки для плоскої плівки й листів:

- а) для одношарових плівок і листів;
- б) для багатошарових плівок і листів;

4) головки для виробництва труб, рукавів та армованих шлангів:

- а) для виробництва напірних труб;
- б) для виготовлення армованих плоскозгорнутих рукавів;
- в) для виробництва армованих шлангів;
- г) для виробництва гофрованих труб;

- д) для виготовлення гнучких повітроводів, гнучких шлангів, труб великого діаметра навивкою стрічки або профілю на оправку з подальшим їх зварюванням;

- е) головки для виробництва труб з теплоізоляцією;

- ж) головки для виробництва багатоканальних труб;

- з) головки для виробництва багатошарових труб методом співекструзії;

5) профільні головки:

- а) головки для виготовлення трубоподібних профілів;



- б) головки для виготовлення порожнистих профільних виробів;
- в) екструзійні головки для виробництва камерних профілів (наприклад, віконних профілів, підвіконь тощо);
- г) головки для виробництва багатошарових (комбінованих) профілів;
- д) головки для виготовлення армованих виробів (у т.ч. кабельні головки);
- б) головки для виготовлення виробів методом екструзії з роздуванням;
- 7) головки для виробництва моно- і бікомпонентних волокон (останні – співекструзією).

## **11.2. Чинники, що враховуються під час конструювання головок**

Геометричні параметри формуючих каналів, а отже і конструктивне оформлення головки визначається реологічними властивостями розплаву й вимогами до виробу [5, 9–11].

Гідравлічний опір каналів головки має перебувати в області оптимальних робочих характеристик екструдера. Це означає необхідність узгодження типорозміру машини, геометрії черв'яка й технологічних режимів з геометрією виробу, каналів головки й потрібною продуктивністю.

Розподіл швидкостей розплаву на виході з головки має бути максимально однорідним. Невиконання цієї умови призводить до різнотовщинності виробу, утворенню складок і вигинів профілю у напрямі ділянок з меншою швидкістю.

Частково ці явища можна компенсувати за рахунок прийому виробу з швидкістю, більшою за максимальну швидкість виходу розплаву з формуючої щілини (так звана фільтерна витяжка), застосуванням пристроїв регулювання товщини щілини або установкою додаткових калібрувальних пристроїв.

Фільтерна витяжка не повинна перевищувати певної величини (зазвичай 10–20 %, хоча буває і більше – до 100 %), щоб уникнути розривів профілю і появи залишкових напружень, що призводить до викривлення виробу та зміни його форми.

Розміри формуючих каналів мають проектуватися з урахуванням витяжки, усадки й розбухання екструдату.

За високої швидкості екструзії можуть створитися умови досягнення граничної адгезійної міцності та внаслідок високоеластичної турбуленції виникати дефекти поверхні виробів. Це явище прогнозується по досягненню теоретичної або експериментально визначеної критичної швидкості зсуву.

Потрібно уникати різких перепадів поперечного перерізу каналу, за яких критична швидкість зсуву знижується. Кути переходів мають бути по можливості малими або такими, що плавно зменшуються. Форма перерізу каналу має забезпечити відсутність застійних зон («мертвих» зон). Передні й

задні кути звужень і розширень каналів не повинні перевищувати 45–60°. Ці засоби знижують імовірність виникнення високоеластичної турбуленції.

### 11.3. Основні конструктивні особливості екструзійних головок

Більшість екструзійних головок мають канали, що складаються із вхідних, розподільвальних і формуючих ділянок. Кінцеві форма й розміри профілю екструзійних виробів оформлюються мундштуком, який складається з матриці, що формує зовнішні поверхні виробу, і дорна, що формує внутрішні поверхні (рис. 11.1).

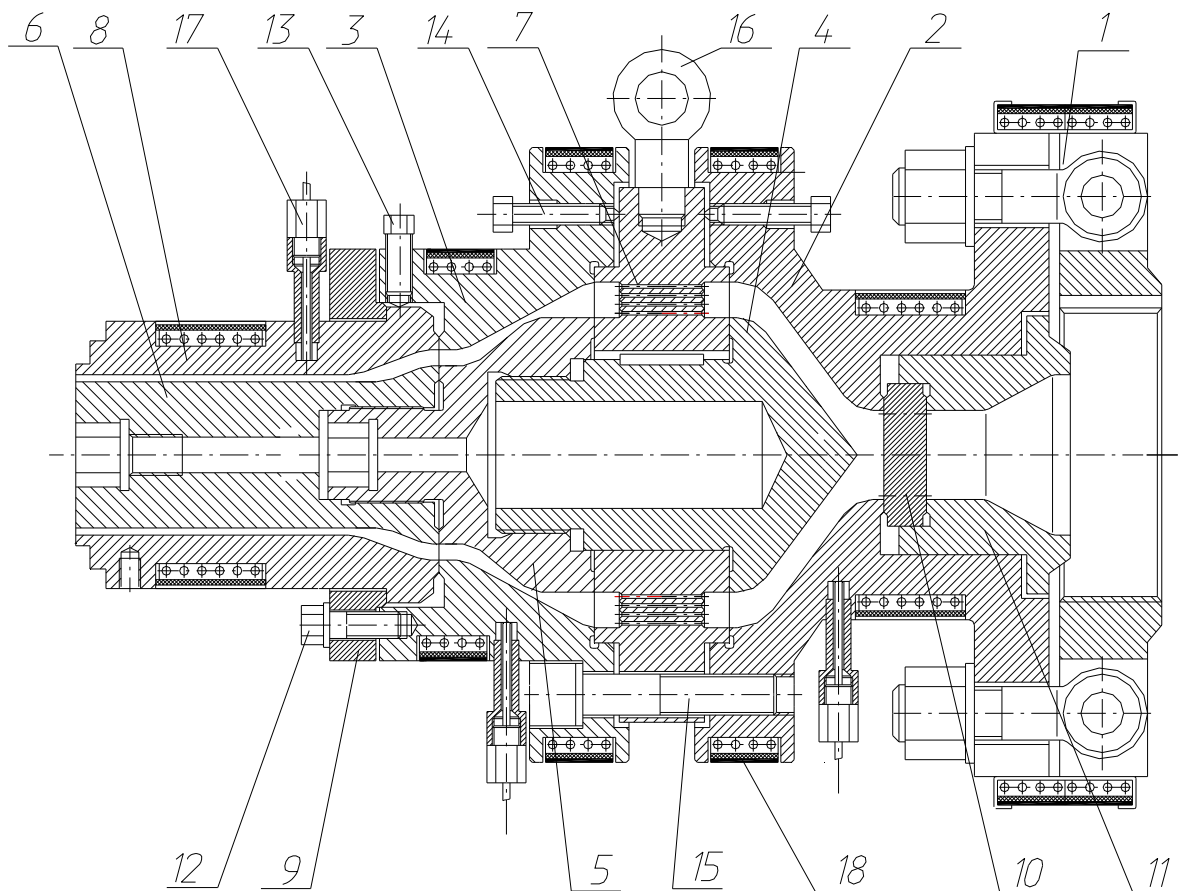


Рис. 11.1. Приклад конструкції головки для виробництва труб: 1 – фланець; 2 і 3 – частини рознімного корпусу; 4 – розсікач; 5 – проміжний дорн; 6 – формуючий дорн; 7 – дорнотримач; 8 – матриця; 9 – кільце; 10 – фільтрувальна решітка; 11 – втулка; 12, 14, 15 – болти кріпильні; 13 – болт регулювальний; 16 – рим-болт; 17 – термопара; 18 – нагрівники

Часто мундштуки виконують швидкозмінними для швидкого переходу на продукцію іншого типорозміру. Кріплення дорну проводиться на дорнотримачах різної конструкції. Зазвичай передбачається можливість

регулювання товщини профілю в різних перерізах. На вході в головку часто встановлюють решітку з пакетом сіток для фільтрування розплаву і створення потрібного перепаду тиску. Під час виробництва замкнутих профілів (труби, шланги і т.п.) всередину дорну під надлишковим тиском подають повітря для підтримки порожнини і для калібрування розмірів. Мундштук повинен мати на виході канал постійної геометрії для стабілізації течії розплаву полімеру.

#### 11.4. Гідрравлічний розрахунок головок

Для гідрравлічного розрахунку головок застосовують два основних методи: метод ефективної в'язкості, а також точний метод розрахунку

##### 11.4.1. Метод ефективної в'язкості

Заснований на допущенні подібності в'язкості на кожній геометрично постійній ділянці каналу, залежно від розрахованої швидкості зсуву на стінці для ньютонівської рідини.

Цей метод складається з таких стадій:

1) Розбиття каналів на ділянки з постійної геометрією або такою, що монотонно змінюється.

2) Визначення для кожної ділянки коефіцієнта геометричної форми  $K_i$  ( $i = \overline{1, m}$ ; табл. 11.1).

3) Визначення продуктивності на кожній ділянці спільно з характеристикою екструдера ( $\text{м}^3/\text{с}$ ):

$$Q = \frac{K \alpha n}{K + \beta + \gamma},$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт прямого потоку,  $\text{м}^3$ ;  $\beta$  – коефіцієнт зворотного потоку,  $\text{м}^3$ ;  $\gamma$  – коефіцієнт потоку витоку,  $\text{м}^3$ ;  $K$  – сумарний коефіцієнт геометричної форми головки, що складається з відповідних коефіцієнтів для кожної геометрично сталої ділянки,  $\text{м}^3$ :

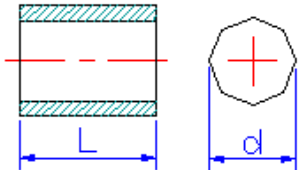
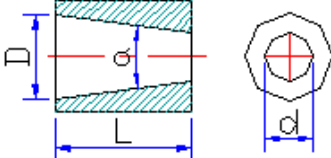
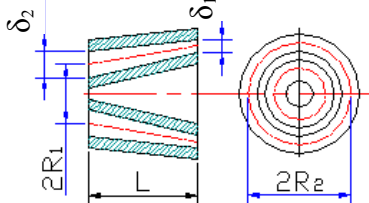
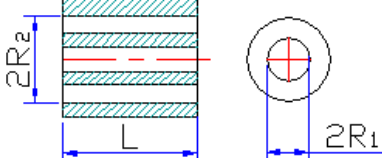
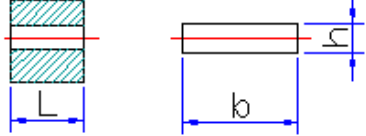
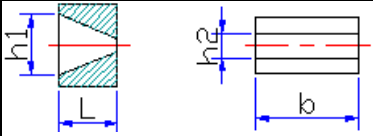
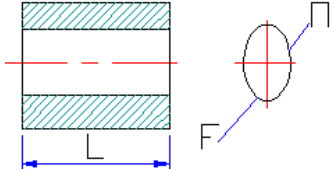
$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \dots + \frac{1}{K_m}} = \sum_{i=1}^m (K_i^{-1})^{-1}.$$

Для  $z$  паралельно розташованих каналів, наприклад каналів решітки,  $K_i = z K'_i$ , де  $K'_i$  – коефіцієнт геометричної форми для одного окремого елемента  $i$ -ї ділянки головки (наприклад, одного отвору решітки).

4) Визначення швидкості зсуву  $\dot{\gamma}_i$  на стінці для кожної ділянки (див. табл. 11.1).

Для  $z$  паралельно розташованих каналів  $\dot{\gamma}_i = \dot{\gamma}'_i / z$ , де  $\dot{\gamma}'_i$  – швидкість зсуву на стінці одного окремого елемента  $i$ -ї ділянки головки.

Таблиця 11.1. Коефіцієнти геометричної форми та швидкості зсуву для ділянок каналів

Тип каналу	Ескіз	$K, \text{м}^3$	$\dot{\gamma}, \text{с}^{-1}$
Круглий циліндричний		$\frac{\pi d^4}{128L}$	$\frac{32Q}{\pi d^3}$
Круглий конічний з великим діаметром на вході		$\frac{3\pi D^3 d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)}$	$\frac{256Q}{\pi(D+d)^3}$
Конічний кільцевий з конічної щілиною <sup>1</sup>		$\frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6L\omega}$	$\frac{22,32Q}{\pi(R_1 + R_2)(\delta_1 + \delta_2)}$
Круглий кільцевий		$\frac{\pi}{8L} \left[ R_2^4 - R_1^4 - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right]$	$\frac{5,58Q}{\pi(R_1 + R_2)(R_2 - R_1)^2}$
Плоский щілинний		$\frac{bh^3}{12L}$	$\frac{5,58Q}{bh^2}$
Щілинний клиноподібний		$\frac{bh_1^2 h_2^2}{6L(h_1 + h_2)}$	$\frac{11,16Q}{b(h_1 + h_2)^2}$
Циліндричний з довільним поперечним перерізом <sup>2</sup>		$\frac{F^3}{2L\Pi^2}$	$\frac{2Q\Pi}{F^2}$

Примітки:

$$1. \omega = \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1\delta_2 - R_2\delta_1} \right)^2 \ln \left( \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} \right) - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2};$$

2.  $F$  – площа поперечного перерізу каналу,  $\text{м}^2$ ;  $\Pi$  – периметр поперечного перерізу,  $\text{м}$ .

5) Для кожної ділянки каналу головки за кривою течії визначають ефективну в'язкість  $\mu_{\text{ef } i}$  (Па·с).

6) Визначення перепаду тиску на кожній ділянці з урахуванням в'язкості як функції швидкості зсуву на стінці  $\dot{\gamma}_i$  і температури.

Перепад тиску на ділянці, Па

$$\Delta P_i = \frac{Q \mu_{\text{ef } i}}{K_i},$$

де  $\mu_{\text{ef } i}$  – ефективна в'язкість на кожній ділянці каналу.

Сумарний перепад тиску в головці, Па

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \dots + \Delta P_n.$$

Через відсутність урахування змін швидкості зсуву внаслідок змінних реологічних властивостей похибка під час визначення перепаду тиску може досягати 10–15 %.

#### 11.4.2. Точний метод розрахунку

Цей метод ґрунтується на врахуванні закону реологічних властивостей розплаву.

Він складається з таких стадій:

- 1) Розбиття каналів як в методі ефективної в'язкості (див. п. 11.4.1).
- 2) Визначення для кожної ділянки продуктивності як функції реологічних характеристик і геометричної форми, перепаду тиску і швидкості зсуву як функції продуктивності, реологічних і геометричних параметрів.
- 3) Визначення реологічних параметрів з урахуванням визначених продуктивності і швидкості зсуву.
- 4) Визначення коефіцієнта геометричної форми ділянки каналу.
- 5) Визначення продуктивності як функції коефіцієнта геометричної форми і перепаду тиску:

$$\tau = \mu_0 \dot{\gamma}^n;$$

$$Q = K \Delta P^n.$$

Далі пп. 2–5 перераховується ітераційним шляхом.

Недолік цього методу – відповідні залежності з урахуванням неньютонівських властивостей перероблюваного матеріалу відомі для незначної кількості каналів простої геометрії.

Канали складнішої форми доводиться апроксимувати різними методами, що може призвести до певної похибки розрахунку.

## 12. ПРЯМОТЕЧІЙНІ КІЛЬЦЕВІ І ПРОФІЛЬНІ ГОЛОВКИ

### 12.1. Прямотечійні кільцеві головки

До прямотечійних належать головки для грануляції (стренгової і на решітці), для виробництва більшості видів труб і шлангів, головки для екструзії широких смуг і листів, головки для виготовлення основних видів профільних виробів, оснащення для плунжерної екструзії.

Прямотечійні кільцеві головки мають просту конфігурацію й симетричність форми, що забезпечує майже абсолютну рівність швидкостей по поперечному перерізу каналу. Проте дефекти виробу можуть виникнути внаслідок перекосів конструкції, сил тяжіння або нерівномірності температури. Тому в трубних головках зазвичай передбачають пристрій радіального переміщення матриці для корегування рівнотовщинності в коловому напрямку, наприклад радіально розташовані болти, якими надається певний ексцентриситет матриці відносно дорна.

Часто передбачається можливість екструзії на одній головці труб різних розмірів, для цього виконують швидкозмінні мундштуки (пари «дорн – матриця»). Іноді мундштуки сполучають з калібрувальним пристроєм.

Для виробництва труб (гладких, гофрованих, перфорованих) і шлангів застосовують кільцеву прямотечійну головку (рис. 12.1).

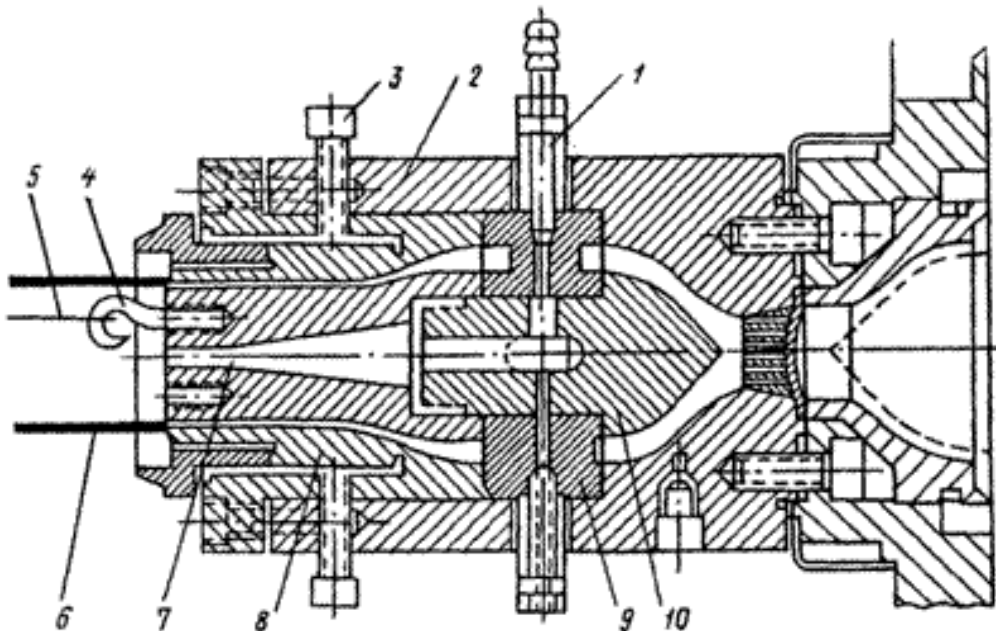


Рис. 12.1. Прямотечійна кільцева головка для виготовлення труб і шлангів: 1 – штуцер для підведення стисненого повітря; 2 – корпус; 3 – регулювальні гвинти; 4 – кріпильний пристрій; 5 – трос для втримання ковзних пробок у трубі; 6 – трубна заготовка; 7 – канал для надходження в трубу стисненого повітря; 8 – матриця; 9 – дорнотримач; 10 – дорн

Товщину стінки екструдованої трубчастої заготовки регулюють обертанням декількох регулювальних гвинтів 3. Прямотечійна частина головки відносно довга: її довжина становить 5–20 значень товщини труби. Якщо калібрувальну насадку не застосовують, то для одержання екструдату з більшою точністю розмірів це відношення збільшується до 20–40.

Тиск розплаву в головці перебуває в межах 15–20 МПа (рідше до 30 МПа). До дорна 10 кріпиться трос 5 або ланцюг, що втримує ущільнювальні пробки, які ковзають по внутрішній поверхні труби. Пробки потрібні також і для створення внутрішнього тиску в трубній заготовці для її калібрування по зовнішньому діаметру. Для калібрування по внутрішньому діаметру пробки не застосовують.

Довжина калібрувального каналу постійного поперечного перерізу на виході зазвичай для стабілізації течії і релаксації внутрішніх напружень в розплаві складає 10–30 значень товщини труби. Для зменшення маси головок для труб великого типорозміру дорн можуть виконувати порожнистим з установкою всередині нього нагрівників. Дорн кріпиться на дорнотримачах у вигляді стійок («павукові ноги»), решіток або кілець (рис. 12.2). Довжина стійок становить 30–80 мм, а їхня ширина – 9–12 мм. Розтинаючи потік розплаву, дорнотримачі створюють проблему наявності ліній зварювання потоків, які особливо ослаблюють виріб, якщо полімер характеризується поганою зварюваністю.

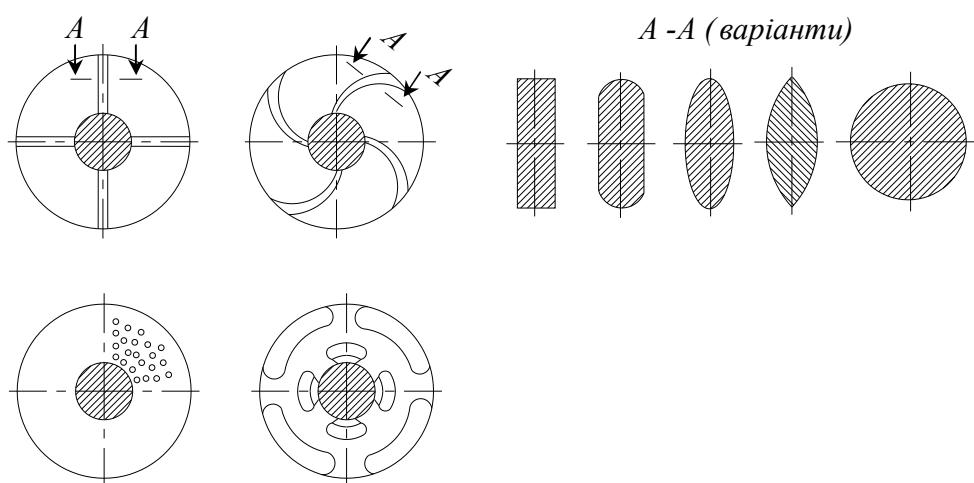
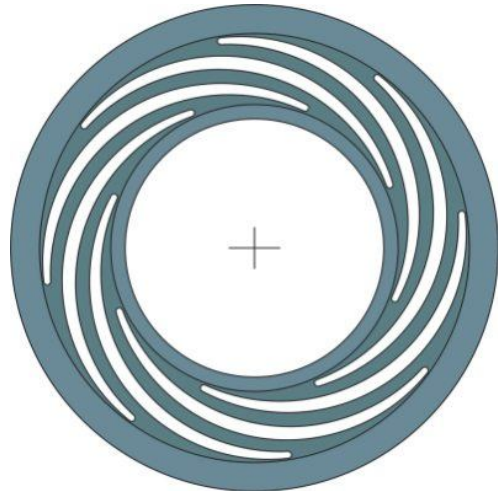


Рис. 12.2. Види дорнотримачів

Існує спосіб уникнути зниження міцності труби через «спайки» – необхідно розподілити їх не перпендикулярно стінці труби, а по спіралі (рис. 12.3). Такі труби виходять майже витими з тонких шарів полімеру, що також підвищує їхні механічні властивості, оскільки неоднорідність розплаву зосереджується не вузьким подовжнім місцем на трубі по всій товщині стінки, а розподіляється вузьким шаром у товщині стінки по всьому її перерізу (рис. 12.3,б).



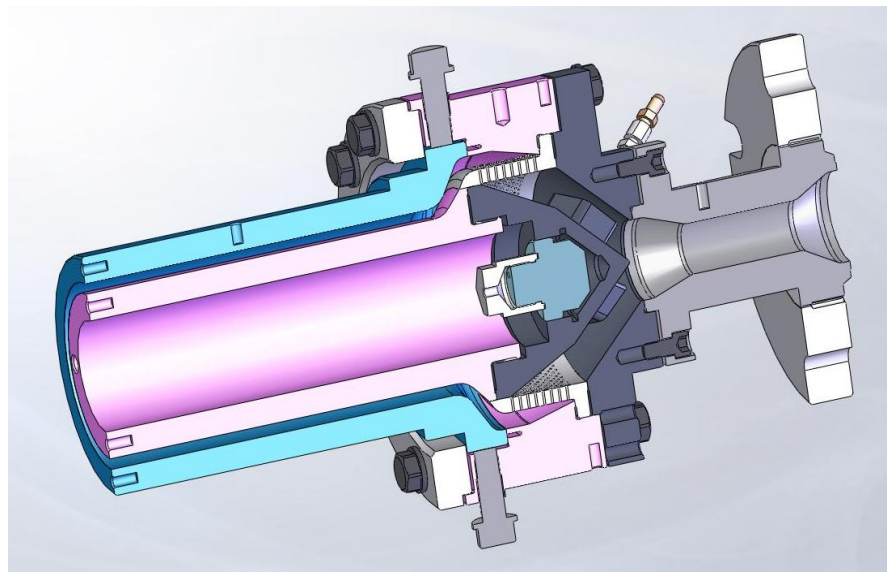
*a*



*б*

*Рис. 12.3. Спиральний дорнотримач (а) і розподіл розплаву (б)*

Найменший розсікальний ефект створюють дорнотримачі у вигляді решітки з діаметром отворів 1,5–2,5 мм, проте через малий поперечний переріз вони створюють високий опір, тому для збільшення цього перерізу їх доцільно виготовляти у вигляді стакана з перфорованими стінками (рис. 12.4). Розплав для проходження поперечних решіток має змінити подовжній напрям течії на поперечний. За решіткою він потрапляє в подовжній кільцевий канал, де знову змінює напрям вже на осьовий. Інтенсивне перемішування струменів, спричинених розділенням потоку отворами, при їх подвійному повороті також сприяє надійному з'єднанню. Оскільки в головці під час течії в'язкої рідини створюється високий тиск, то злиття струменів один з одним з утворенням однорідного потоку відбувається швидко та ефективно.



*Рис. 12.4. Трубна головка з поперечними решітками*



Для розмивання ліній зварювання застосовують такі прийоми:

- 1) зниження площі поперечного перерізу за дорнотримачами в 3–5 разів;
- 2) застосування локальних звужень поперечного перерізу;
- 3) обертання дорну або матриці;
- 4) виконання нарізки на ділянці дорну багатозахідної спіральної нарізки, що звужується, з глибиною, що зменшується до виходу (рис. 12.5).

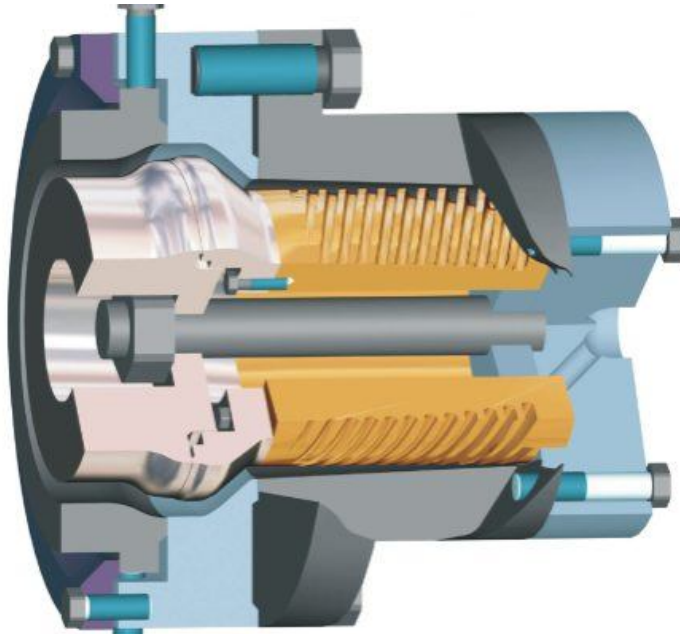


Рис. 12.5. Трубна головка із спіральним розподільником

Спіральні розподільники потоків і дорнотримачі з поперечними решітками ефективно використовуються і в головках для виготовлення багат шарових труб (рис. 12.6). Основний потік розплаву покривається ззовні і зсередини шаром іншого матеріалу. Такого типу головки на тепер широко використовуються для виготовлення три шарових труб, у яких внутрішній і зовнішній шари виконують з основного матеріалу (наприклад, ПЕНТ, непластифікований ПВХ), а внутрішній шар може бути виконано із спіненого або вторинного матеріалу. Використання три шарових труб дає змогу полегшувати труби, поліпшувати їхні теплоізоляційні властивості або знижувати вартість за рахунок використання вторинних ресурсів

Головки для виготовлення одно шарових гофрованих труб мають звичайну конструкцію для трубних головок невеликого й середнього розміру. Їхня відмінність полягає в тому, що вони мають довгі мундштук і дорн, які потрібні для підведення трубчастої заготовки майже впритул до півформ тракового пристрою, які стуляються між собою. Через таку конструкцію вони не можуть обігріватися постійно, оскільки нагрівник заважає стуленню півформ. Обігрівання здійснюється стартовим нагрівником, який виконується

у вигляді знімної втулки з нагрівальним елементом всередині. Перед пуском дорн і мундштук прогрівають стартовим нагрівником, який потім знімають і продовжують процес екструзії вже без зовнішнього обігріву.

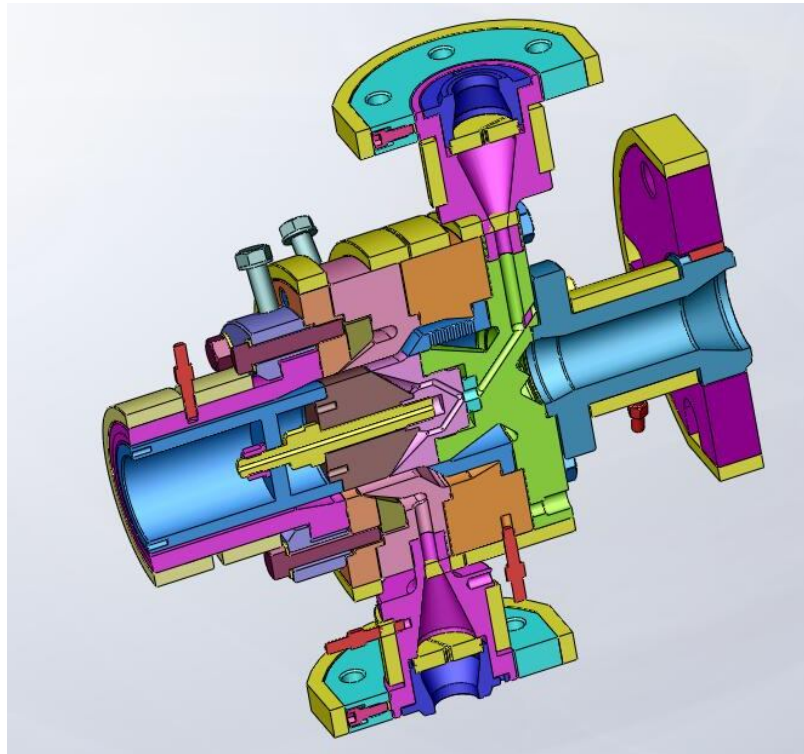


Рис. 12.6. Співекструзійна трубна головка

Прямотечійними кільцевими часто виконують також гранулювальні головки (рис. 12.7).

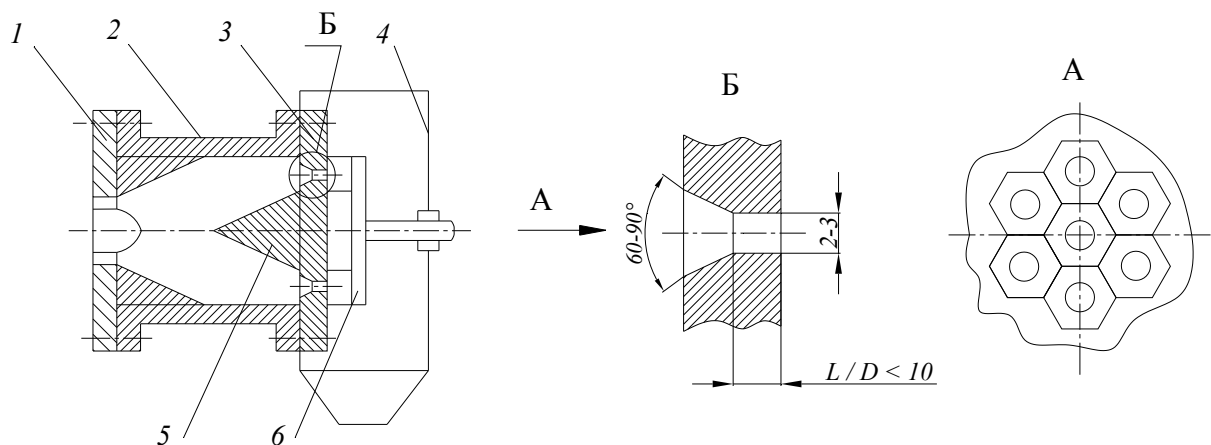


Рис. 12.7. Кільцева гранулювальна головка: 1 – фланець екструдера; 2 – корпус головки; 3 – фільтрна плита; 4 – розсікач; 5 – обертовий ніж; 6 – приймальна камера з повітряним або водяним охолодженням

Великотоннажне виробництво більшості видів гранульованих полімерних матеріалів здійснюється гранулюванням на решітці. Екструзійна головка для такого процесу представляє собою масивний корпус, на виході з якого встановлено перфоровану решітку з великою кількістю отворів, розташованих у декілька рядів зазвичай по концентричних колах. Агрегат складається з екструзійної головки і приводу обертання ножів, розташованих у приймальній камері.

Підведення розплаву до формуючих отворів здійснюється крізь канал, утворений корпусом головки й конічним розсікачем. З боку входу в решітку отвори роззенковують до зіткнення їх між собою для усунення застійних зон. Діаметр отворів решітки становить 2–4 мм, а її товщина – 20–50 мм (залежно від призначення головки за перероблюваним матеріалом і продуктивністю екструдера). Для одержання зекстурованих із головки стренг (прутків) однакового діаметра зовнішні отвори виконують дещо більшими, ніж ті, що примикають до розсікача, що вирівнює опір течії по висоті решітки. Можуть бути також і інші шляхи вирівнювання розмірів стренг.

З боку виходу підводиться обертовий ніж, який з великою швидкістю зрізує стренги. Залежно від типу гранульованого матеріалу і швидкості обертання ножа, стренги, що зрізуються, мають вид бочонків, чечевиці або кульок. Інколи отвори в решітці виконують квадратними або прямокутними. Такі гранули займають менший об'єм під час транспортування внаслідок кращої упаковки і сприяють кращому захопленню витками шнека в зоні завантаження. Але такі головки складніші й дорожчі у виготовленні.

Торцева поверхня решітки піддається зношуванню обертовим ножем, тому решітки повинні мати підвищену твердість і бути виконані з конструкційної й корозійностійкої сталі. Ніж має певний кут заточування різального пругу.

Зазор між решіткою й поверхнею ножа регулюється залежно від в'язкості розплаву і вимог до гранулометричного складу матеріалу. Для низьков'язких матеріалів (поліолефінів) цей зазор менше ніж для високов'язких (композиції НПВХ).

Гранулювання проводять за мінімально можливої температури, що значною мірою зменшує проблеми процесу, пов'язані з «розмазуванням» розплаву по решітці. Збільшення зазору між ножем і решіткою, затуплення ножа, зниження швидкості його обертання, підвищення температури в зоні контакту – це основні причини, через які розплав розмазується по решітці.

Приймання й попереднє охолодження гранул здійснюється в камері, що примикає до гранулювальної решітки, в току води (для низьков'язких матеріалів) або під вакуумом (для ПВХ та інших високов'язких матеріалів).

Вакуумування камери перешкоджає окисненню матеріалу на виході з головки і сприяє швидкому видаленню гранул у зону охолодження.

На великих агрегатах для гранулювання поліолефінів досягають продуктивності до 25 т/год, продуктивність же агрегатів для гранулювання ПВХ досягає 3–6 т/год.

Головки для стренгової грануляції частіше виконують у прямокутному корпусі з одним або двома рядами отворів по ширині. Оскільки між рядами отворів відстань невелика, то розділяти ряди отворів розсікачем немає потреби. Для широких головок передбачається зниження опору течії по краях шляхом збільшення діаметра периферійних отворів, поглиблення каналів у бокових зонах і т.д., що дає змогу зменшити різницю в швидкостях течії в центральній області і по периферії.

Отвори в рядах розташовують у шаховому порядку для запобігання зварюванню стренг на виході їх з головки. Стренгову грануляцію проводять за вищих температур розплаву порівняно з грануляцією на решітці, тому таке розділення отворів у рядах необхідне. Діаметр отворів у головках для стренгової грануляції можна брати більшим, тому що розплав піддається витяжці, за якої поперечний переріз стренг зменшується. Залежно від реологічних властивостей гранульованого матеріалу діаметр отворів становить 4–7 мм.

Охолодження стренг проводиться у відкритій водяній ванні, перед подачею до різального пристрою стренги заздалегідь осушують стисненим повітрям.

Різання прутків на гранули циліндричної форми здійснюється фрезою, що обертається з регульованою швидкістю. Стабільність роботи різального пристрою залежить від відмінності в розмірах прутків по ширині щілини. Значна відмінність може спричиняти застрягання товстих або прослизання тонких прутків між різальними ножами, що потребує повторної наладки процесу.

Продуктивність стренгової грануляції значно нижча від продуктивності грануляції на решітці. Але такий спосіб простіший і не потребує складного спеціального обладнання.

## **12.2. Профільні головки**

Найбільш складними для розрахунку є профільні головки, оскільки канали в них можуть бути дуже різними за розміром, а отже відрізнятимуться в'язкість і температура розплаву через різну швидкість зсуву та умов теплообміну. Основні труднощі процесу – вирівнювання об'ємної швидкості різних потоків розплаву в головці по всьому поперечному перерізу профілю. Навіть за наявності сучасної обчислювальної техніки і спеціального програмного забезпечення, наприклад, в Німеччині у середині 1990-х рр. для створення нової профільної головки в середньому було потрібно сімнадцять доведень «в залізі». Для кінцевого вирівнювання швидкостей застосовують спеціальні насадки: дросельні або перфоровані шайби та ін.

Прямотечійні головки використовують для виготовлення трубних, порожнистих, камерних і суцільних профілів. Трубоподібні профілі отримують на звичайних трубних головках з використанням такого самого формуючого інструменту, що і для виготовлення звичайних труб. Формування профілю потрібної геометрії здійснюється у вакуумному калібрувальному пристрої методом пластичної деформації. Калібратор може бути довгомірним або представляти собою втулку, установлену на вході у вакуумну ванну. Трубчаста заготовка поступово перетвориться на виріб потрібної форми на ділянці між головкою й калібратором.

Метод пластичної деформації (postforming) часто застосовують для формування деяких видів профілів із заготовок простого поперечного перерізу. Наприклад, відомий виріб «сайдинг» отримують з використанням щільної головки завширшки 250–400 мм і двох послідовно установлених калібраторів для попереднього та остаточного формування сайдинг-панелі або комплектувального профілю до панелі. Текстурування поверхні панелі здійснюють відразу після головки в тиснільних валках, робоча поверхня яких має різноманітний малюнок.

Головки для виготовлення порожнистих і камерних профілів схожі з головками для виробництва труб. Відрізняються вони складнішою конструкцією дорну, іноді дорнотримача, загальною компоновкою деталей, а також зазвичай відсутністю регулювання зазорів між мундштуком (фільєрою) і дорном. Головки блендової конструкції мають циліндричний адаптер і корпус головки, до якого приєднуються прямокутні проміжні деталі й формуюча частина (фільєра). Переважно всі деталі виконують нерознімними, що полегшує і здешевлює їх виготовлення.

До камерних профілів належать також «віконні» профілі, з яких складають пластмасові вікна та двері. Головки для їх виготовлення також виконують бленовими. Подачу повітря в порожнині профілю здійснюють крізь отвори в спицях дорнотримача й дорну. Зазвичай подача повітря у внутрішню порожнину профілю передбачається завжди, але іноді під час екструзії деяких високов'язких розплавів (наприклад, непластифікованого ПВХ) отвори в дорні не виконують, якщо немає небезпеки зварювання близько розташованих стінок профілю між собою.

Товщина стінок профілю має бути по можливості однаковою й відносно невеликою. Основним завданням під час проектування головок є забезпечення рівності швидкостей у всіх поперечних перерізах профілю. За різної товщини профілю доводиться регулювати довжину каналів на різних ділянках. Після охолодження такого профілю можуть утворитися залишкові напруження, що виявляється у викривленні або розтріскуванні виробу.

Основні складнощі виникають під час проектування й виготовлення перехідних каналів від круглого або кільцевого перерізу на вході до кінцевого

профілю (рис. 12.8 і 12.9). Часто їх утворюють декілька деталей, тобто матриця виконується складеною. При цьому перехід має бути плавним, без різких змін поперечного перерізу й застійних зон, технологічним у виготовленні, експлуатації і складанні-розбиранні. Лінії стику деталей матриці не повинні потрапляти на лицьові поверхні виробу, а краще за все розташовуватися на кутах. Кути по можливості не мають бути гострими, а мати мінімальний радіус 0,2–0,4 мм. Вигини профілю під гострим кутом і майже замкнуті контури робити в головці небажано – це можна довести в калібрувальному пристрої.

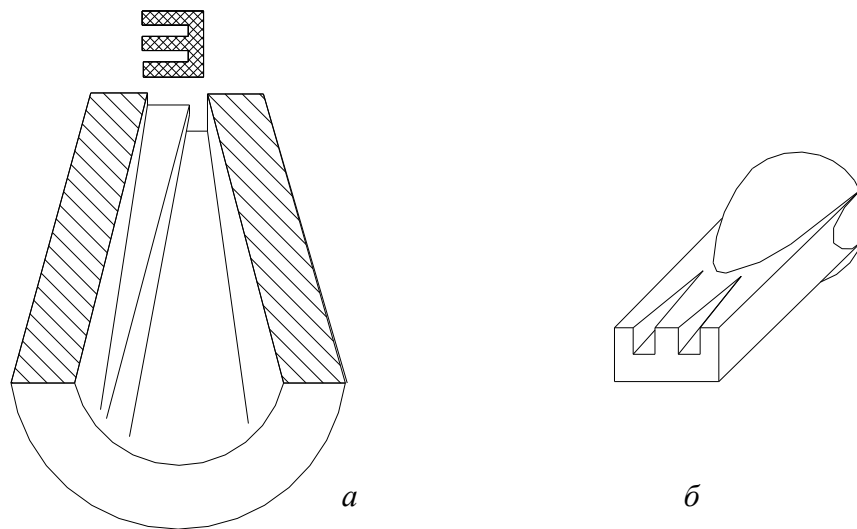


Рис. 12.8. Оснастка для формування Ш-подібного профілю: *а* – геометрія мундштука; *б* – зліпок перехідного і формуючого каналів в блендовій конструкції

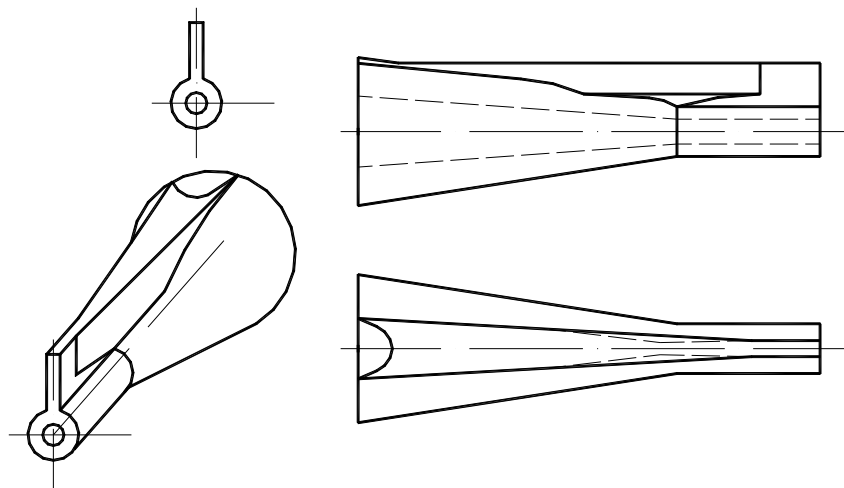


Рис. 12.9. Зліпок і проєкції перехідного і формуючого каналів для екструзії профілю «рояльна петля»

### 13. ПЛОСКОЩІЛИННІ ГОЛОВКИ

Плоскощілинні головки призначені для одержання листів, плівок і нанесення покриттів. Вони можуть бути прямотечійними й кутовими. Основне завдання таких головок – перетворення потоку розплаву з круглого перерізу на вході в широку плоску щілину на виході за умови рівності вихідних швидкостей по всій ширині. Для дотримання останньої умови має бути забезпечена рівність опорів по всіх лініях току розплаву. При цьому довжина ліній току має бути мінімальною для зменшення маси головки й часу перебування в ній.

Оскільки довжина ліній току поблизу подовжньої осі і на периферії різна, необхідно створити більший опір потоку поблизу осі. Цього можна досягти, змінюючи довжини каналів або їх висоту, а також комбінуючи ці способи. Альтернативний шлях – збільшити температуру розплаву від осі до країв.

Існують дві основні конфігурації плоскощілинних головок (рис. 13.1): трикутні й колекторні [1, 5].

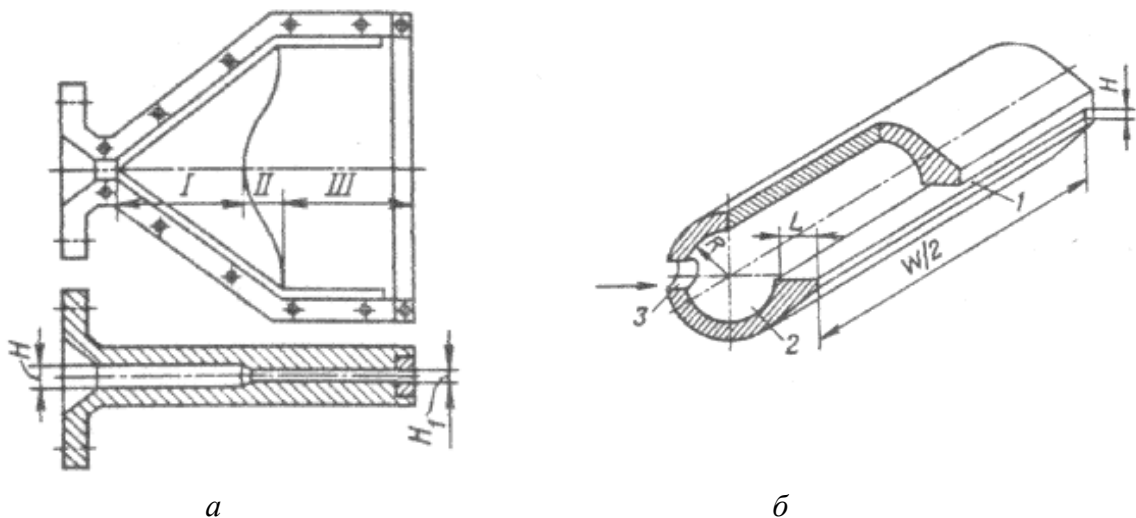


Рис. 13.1. Схеми плоскощілинних головок: а – трикутна, б – колекторна

У трикутних головках розподільний канал має вид щілини більшої висоти, ніж вихідний, з трикутною в плані формою (риб'ячий хвіст) [17–19].

Вхідну зону I виконують у вигляді каналу, що розширюється в щілину від вхідного отвору, переходить у зону II вирівнювання гідравлічного опору по ширині формуючого каналу й потім у зону формуючого каналу III постійної заданої ширини й висоти. Вирівнювання потоку досягається за рахунок зміни співвідношення довжин розподільного й вихідного каналів на ділянці II (рис. 13.1,а) або установкою на цій ділянці елемента опору типу «острівцець» з висотою, що зменшується від осі до країв (рис. 13.2):

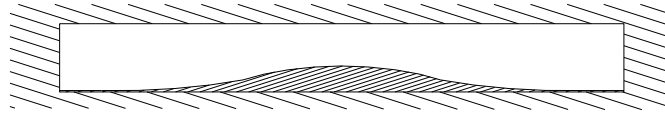


Рис. 13.2. Переріз перехідної ділянки з елементом опору типу „острівець”

Основний недолік трикутних головок полягає в тому, що геометрія зон I і II обумовлює велику площу каналів в плані. Під впливом тиску в них верхня й нижня стінки головки деформуються, що спричинює зміну висоти формуючого каналу і, відповідно, товщини виробу. Для запобігання цього складність конструкції і матеріалоемність головки значно збільшується. Ще одним недоліком є великий час перебування розплаву в головці, що обмежує можливості переробки нетермостабільних матеріалів.

У колекторних головках розплав від центрального отвору підводиться до щілини крізь трубу-колектор з бічним виходом і закритими торцями [20] (рис. 13.3). Натепер це найбільш поширений тип головок. Поперечний переріз колектора може бути різним, найчастіше круглим, прямокутним, трикутним, краплеподібним:

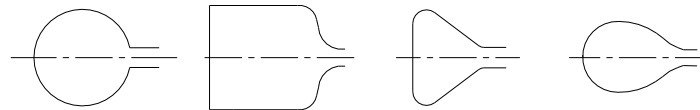


Рис. 13.3. Варіанти перерізів колектора

Для забезпечення рівності опорів по ширині на будь-якій координаті  $z$  має бути виконана умова постійної суми протитисків колектора та щілини

$$P_z^{\text{кол}} + P_z^{\text{щ}} = \text{const.}$$

У колекторі відбувається одночасно два види рухів: вздовж його осі до краю, і з колектора в щілину (рис. 13.4).

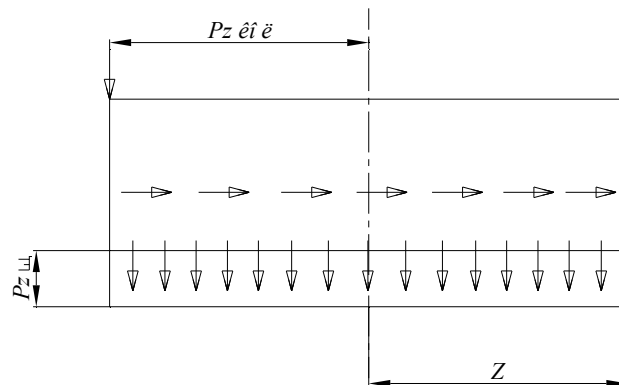


Рис. 13.4. Схема течії розплаву в колекторі і щілині



З одного боку, в кожному перерізі колектора витрата становить

$$Q_z^{\text{кол}} = K_{\text{кол}} \frac{dp}{dz},$$

де  $K_{\text{кол}}$  – коефіцієнт геометричної форми колектора.

Інтегрувати це рівняння по всій ширині не можна, оскільки похідна  $dp/dz$  безперервно змінюється.

З іншого боку, з умови рівності витрати крізь щілину по ширині, витрата крізь ділянку щілини від краю до координати  $z$  пропорційна цій точці перерізу

$$Q_z^{\text{щ}} = \frac{Q}{W} z,$$

причому він рівний витраті крізь колектор у цій точці перетину.

Виходячи з припущення, що залежність швидкості зсуву від дотичного напруження в розплаві підлягають степеневому закону в формі:

$$\dot{\gamma} = m\tau^n,$$

рівняння витрати в щілинному каналі:

$$Q = \frac{m}{n+2} \left( \frac{\Delta P}{L} \right)^n \frac{fH^n}{2^{n+1}},$$

де  $f$  – площа поперечного перерізу каналу;  $H$  – висота щілини;  $L$  – довжина щілини;  $m$  та  $n$  – реологічні константи.

Витрата для колектора, наприклад, круглого перерізу радіусом  $R$ :

$$Q = \frac{\pi m R^{n+3}}{(n+3)(2z)^n} \Delta P^n.$$

Після цього, прирівнявши між собою витрати в двох останніх формулах, отримаємо рівняння, яке можна розв'язати для кожного  $z$  відносно довжини щілини  $L$ , отримавши залежність  $L(z)$ .

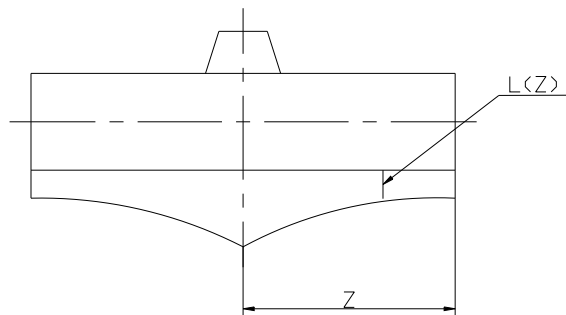


Рис. 13.5. Схема розрахункової конфігурації каналу плоскощілинної головки

Проте в такий спосіб головки не виготовляють, оскільки, по-перше, внаслідок зниження витрати крізь колектор поблизу краю утворюється

застійна зона, а по-друге, через різні точки виходу розплаву з щілини відбуватиметься викривлення виробу, оскільки застигання розплаву буде неодноразовим. Тому крайка щілини має бути плоскою.

Для усунення першого недоліку радіус колектора має зменшуватися від центру до краю за певним законом, наприклад з умови постійної вздовж колектора швидкості течії або швидкості зсуву

$$U_z^{\text{кол}} = \text{const} \quad \text{або} \quad \dot{\gamma}_z^{\text{кол}} = \text{const}.$$

В останньому випадку закон зміни радіуса колектора матиме вигляд

$$R(z)^{\text{кол}} = R_o \left( \frac{W - z}{W} \right)^{1/3},$$

де  $R_o$  – радіус колектора на вході; при цьому радіус на виході має бути не меншим від 0,75 висоти щілини.

Для усунення другого недоліку колектор розташовують під кутом до осі, зберігаючи залежність  $L$  від  $z$ . У результаті отримуємо головку конфігурації, подібної до плечиків для одягу (рис. 13.6).

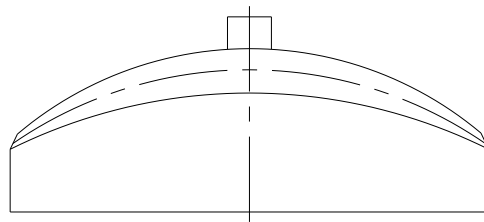


Рис. 13.6. Схема конфігурації каналу головки типу «вішалка»

Для спрощення виготовлення колектора його форму часто випрямляють (рис. 13.7).

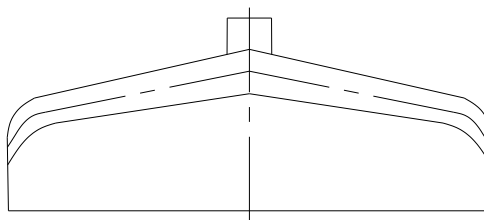


Рис. 13.7. Схема спрощеної конфігурації каналу головки

Неточності в рівнотовщинності, що виникають при цьому, усувають спеціальними пристроями, зокрема гнучкою планкою (рис. 13.8,а, поз. 6) або набором повзунів (рис. 13.8,б, поз. 9).

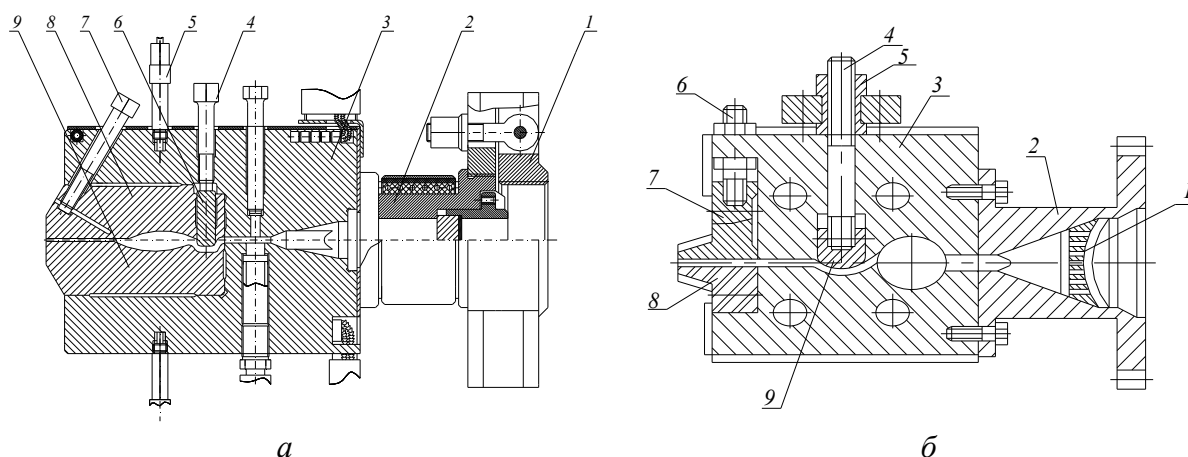


Рис. 13.8. Подовжній розріз плоскощілинної головки: *а* – для виробництва плівок і тонких листів (1 – фланець, 2 – адаптер (перехідник), 3 – корпус, 4 – натискний болт, 5 – термопара, 6 – перетискна планка, 7 – регулювальний болт, 8 – верхня розрізна губка, 9 – нижня губка); *б* – для виробництва товстих листів (1 – фільтрувальна решітка, 2 – адаптер, 3 – корпус, 4 – натискний болт, 5 – гайка, 6 – регулювальний болт, 7 – верхня рухома губка, 8 – нижня нерухома губка, 9 – повзун)

Недоліки цих пристроїв полягають у тому, що гнучка планка має невеликий діапазон регулювання, а регулювальні повзуни мають бути майже ідеально підігнані між собою, в іншому разі розплав затікатиме між ними й розкладатиметься, а на зекструдованому листі з'являться сліди від стиків.

Тонке регулювання досягається вигином формуючих губок (рис. 13.8, *а*, поз. 7, 8). Для виготовлення тонких плівок обходяться останнім, оскільки ступінь вигину губок сумірний з товщиною плівки (рис. 13.9).

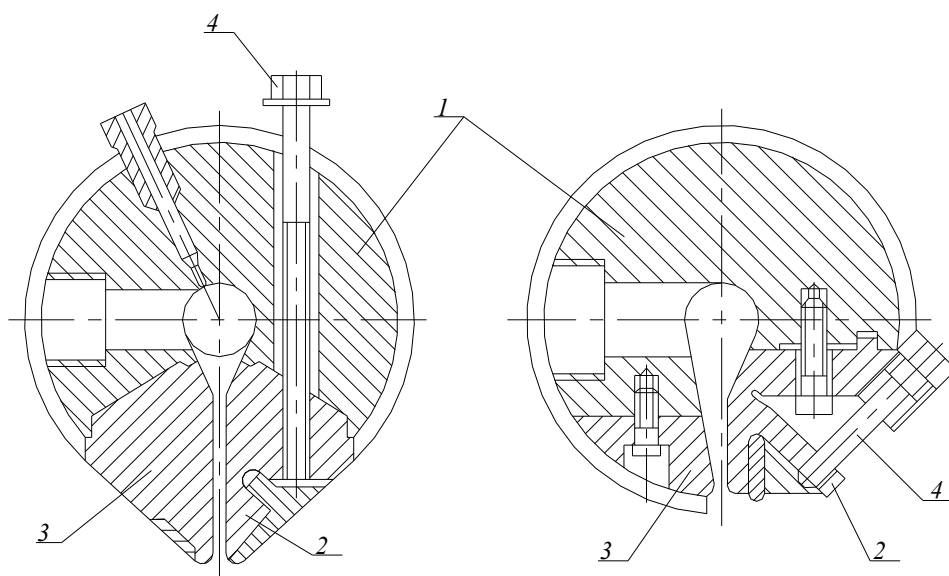


Рис. 13.9. Головки для виробництва тонких плівок: 1 – корпус, 2 – верхня регульована губка, 3 – нерухома губка, 4 – регулювальний болт

Кількість регулювальних болтів у широких щілинних головках вимірюється десятками, тому ручне регулювання товщини плівки або листа, що виходять з головки потребує значних витрат часу й сировини. Натепер вручну здійснюють лише грубе регулювання для запуску нової продукції, а в процесі виробництва застосовують так звані термоболти, виготовлені із сплаву з великим коефіцієнтом лінійного розширення. Кожен термоболт забезпечений електричним нагрівником і каналом для охолоджувальної рідини. На виході з головки встановлюють пристрій безперервного вимірювання товщини екструдату в декількох точках по його ширині.

У разі відхилення товщини в більшу сторону надходить сигнал на нагрівник відповідного термоболта, внаслідок нагріву останній подовжується, натискаючи на регулювальну планку і звужуючи канал у локальній області. У разі зменшення товщини надходить сигнал на клапан подачі охолоджувальної рідини, і термоболт скорочується, розширюючи при цьому канал і, відповідно, збільшуючи витрату й товщину екструдату на відповідній ділянці.

## 14. КУТОВІ КІЛЬЦЕВІ ГОЛОВКИ

У кутових головках здійснюється поворот потоку розплаву зазвичай на  $90^\circ$ . Частіше за все таку конструкцію мають головки для виробництва рукавної плівки, трубних заготовок в агрегатах для роздування порожнистих виробів, а також виготовлення кабелів. Усі ці головки мають кільцевий вихід. Основні проблеми під час конструювання полягають у тому, що при повороті лінії току розплаву відстань, пройдена розплавом, неоднакова, а на виході потрібно отримати однорідність швидкостей.

Поворот можна здійснювати центральною трубою до дорну, але це збільшує габарити головки. Другий метод вирівнювання швидкостей по колу – поворот навколо дорну, який здійснюється так, щоб довжина ліній току або перепад тиску були однаковими в кільцевому напрямку (рис. 14.1). Такі канали є аналогом каналів плоскощільної головки, згорнутих в кільце. Корегування здійснюється регулюванням ексцентриситету матриці відносно дорна.

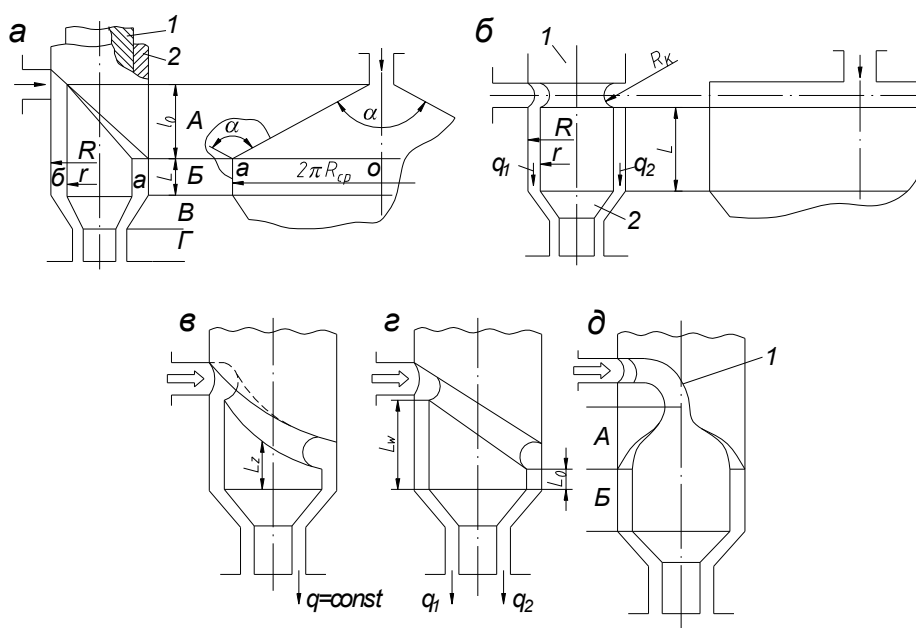


Рис. 14.1. Схеми каналів кутових кільцевих головок

У варіантах конструкції з обтіканням дорну останній закріплюють піноллю з великою площею опори на корпус. Це забезпечує потрібну жорсткість його установки, відсутності дорнотримачів і ліній зварювання (рис. 14.2). Проте виникають труднощі в забезпеченні рівних швидкостей.

Плівкові головки з пінольним дорном (рис. 14.3) натеper зустрічаються рідко. У цьому варіанті для вирівнювання швидкостей передбачено проміжний колектор.

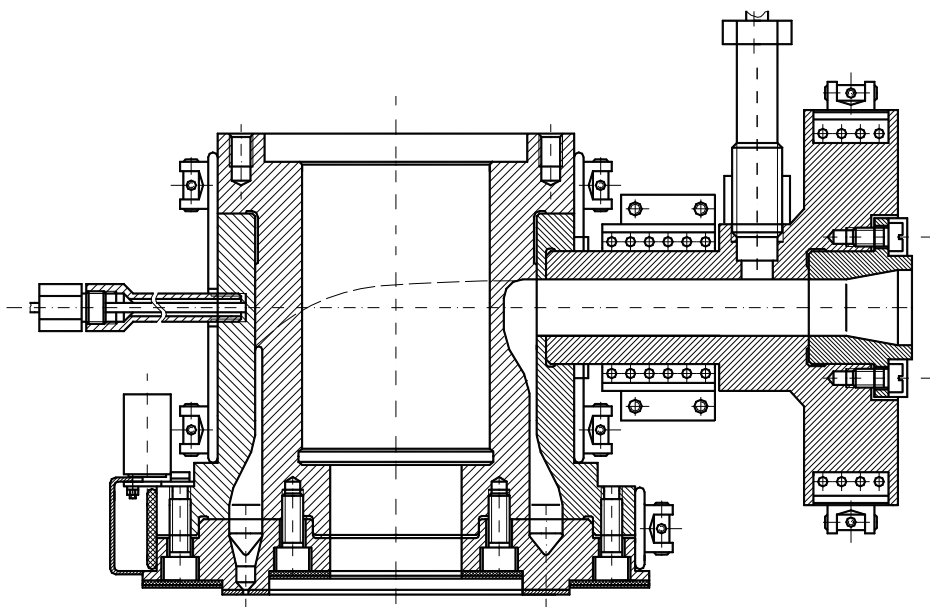


Рис. 14.2. Приклад конструкції кутової гранулювальної головки

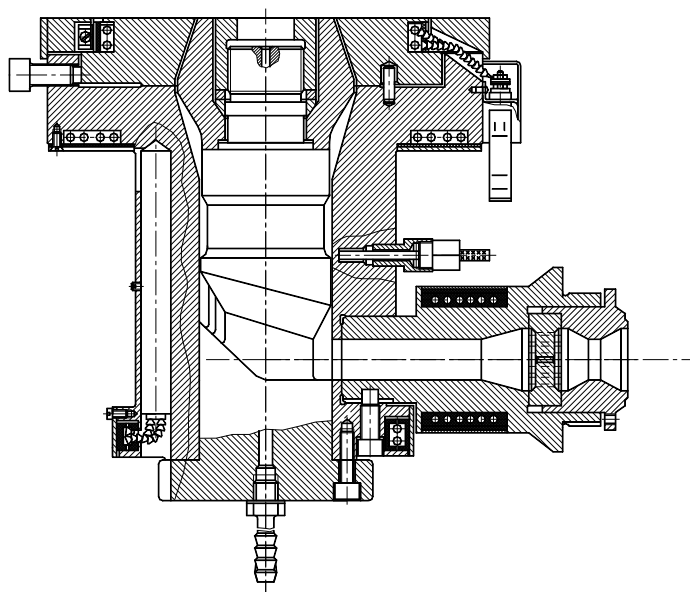


Рис. 14.3. Конструкція плівкової головки з пінольним дорном

Частіше з центральної труби розплав підводять у кільцевий канал крізь радіальні отвори (схема «зірка», рис. 14.4). Для розмивання ліній зварювання застосовуються спіральні канавки на дорні із глибиною, що зменшується, причому кожен отвір виходить в окрему канавку.

У головках із спіральним розподільником потік на вході в головку розділяється на декілька радіальних потоків, які в спіральному розподільнику трансформуються в два основних потоки. Один потік – кільцевий – тече по зовнішній стороні розподільника в кільцевому зазорі, що звужується до

виходу, а другий – багатозаходний спіральний потік – у спіральному каналі змінної глибини, що зменшується до виходу. Частина розплаву при цьому закручується. На виході з розподільника струмені спірального й кільцевого потоків зливаються в однорідну за температурою і властивостями масу, без холодних спаїв, і крізь регульований кільцевий зазор об'єднаний потік розплаву виходить з головки.

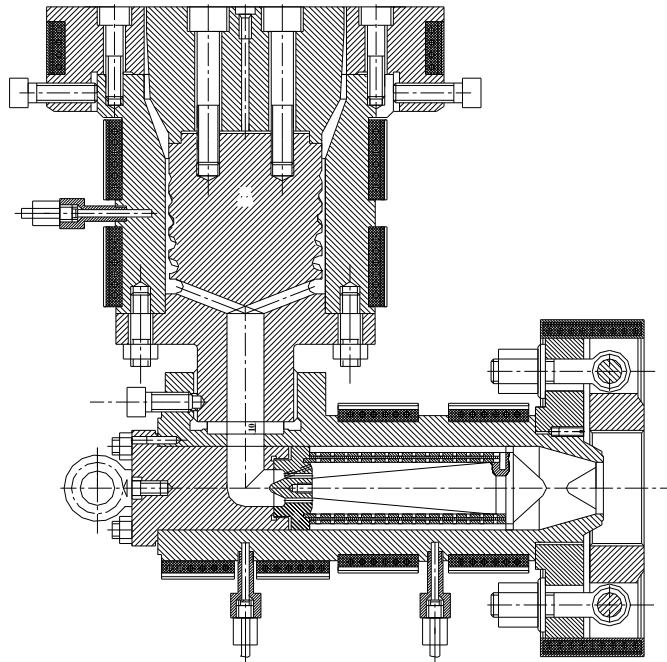


Рис. 14.4. Конструкція плівкової головки із спіральним розподільником

Межі між потоками не існує, витрата кожного залежить від геометричних характеристик каналів і технологічних параметрів течії. Сумарний потік залишається при цьому незмінним, а залежно від форми і розмірів кільцевого й радіальних каналів змінюється співвідношення потоків, сумарний перепад тиску в головці, інтенсивність перемішування і максимальна швидкість екструзії.

Більш радикальним засобом, який також може застосовуватися в поєднанні із спіральним розподільником, є обертання дорну або матриці. Простіше забезпечити привід обертання матриці, але тоді потрібно передбачити струмозйомники для підведення електрики до нагрівників і зняття сигналів з термодатчиків. Компромісним варіантом є головки з реверсивним приводом, що роблять не повний оберт, а зворотно-обертовий рух, наприклад на  $270^\circ$ . У цьому разі електричний струм і сигнали проходять по гнучких кабелях. Недоліком обертових головок є вузли ущільнення між нерухомими та обертовими елементами.

Кабельні головки призначені для нанесення покриттів на кабельну жилу або багатожильний дріт (рис. 14.5).

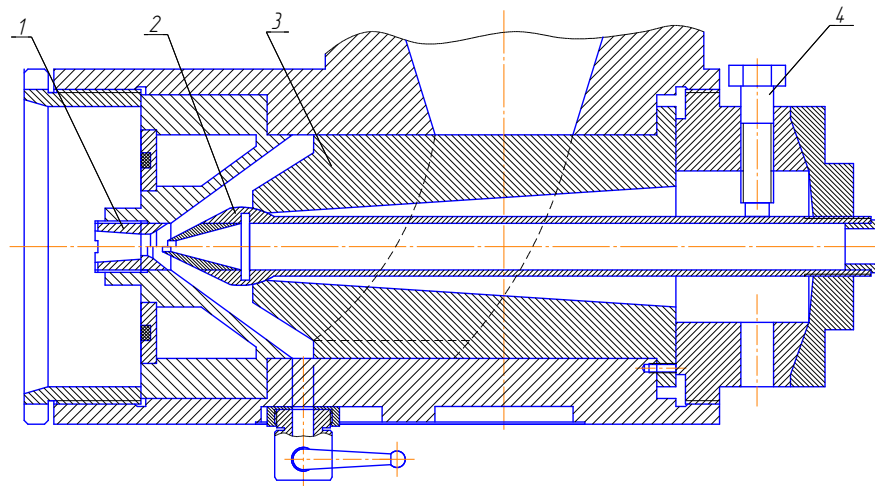


Рис. 14.5. Конструкція кабельної головки: 1 – матриця, 2 – порожнистий дорн, 3 – піноль, 4 – пристрій центрування дорна

На відміну від інших кільцевих головок, внутрішня поверхня кабельної головки утворена рухомим дротом, що створює додатковий винос розплаву. Під час розрахунку це необхідно враховувати, щоб не відбулося розрідження з порушенням суцільності на виході.

Продуктивність виносу складається із звичайною розрахунковою:

$$Q_{\text{вих}} = Q_p + Q_{\text{виносу}};$$

$$Q_{\text{виносу}} = \frac{\pi V_0 d_{\text{в}}^2}{4} \left[ \frac{(d_{\text{н}} / d_{\text{в}})^2 - 1}{2 \ln(d_{\text{н}} / d_{\text{в}})} - 1 \right],$$

де  $V_0$  – швидкість жили, м/с (зазвичай 0,25–0,4 м/с);  $d_{\text{в}}$ ,  $d_{\text{н}}$  – внутрішній і зовнішній діаметри кабельної оболонки, відповідно, м.

Одним з видів кутових кільцевих головок є головки для роздування трубчастих заготовок в порожнисті вироби (рис. 14.6). Зазвичай їх споряджають пристроями регулювання товщини й рівнотовщинності заготовок.

Під час проектування таких головок потрібно враховувати, що полімерна заготовка на виході з них не піддається ані калібруванню, ані витяжці, за винятком сили власного тяжіння.

Ступінь витончення заготовки в будь-якому перерізі по її висоті пропорційна масі частини заготовки нижче цього перерізу й часу дії цієї маси. У верхній частині заготовки вага максимальна, але час дії дорівнює нулю, а в нижній частині – навпаки. Таким чином, максимальний ступінь витончення трубчастої заготовки має місце в середній її частині, ближче до верху.



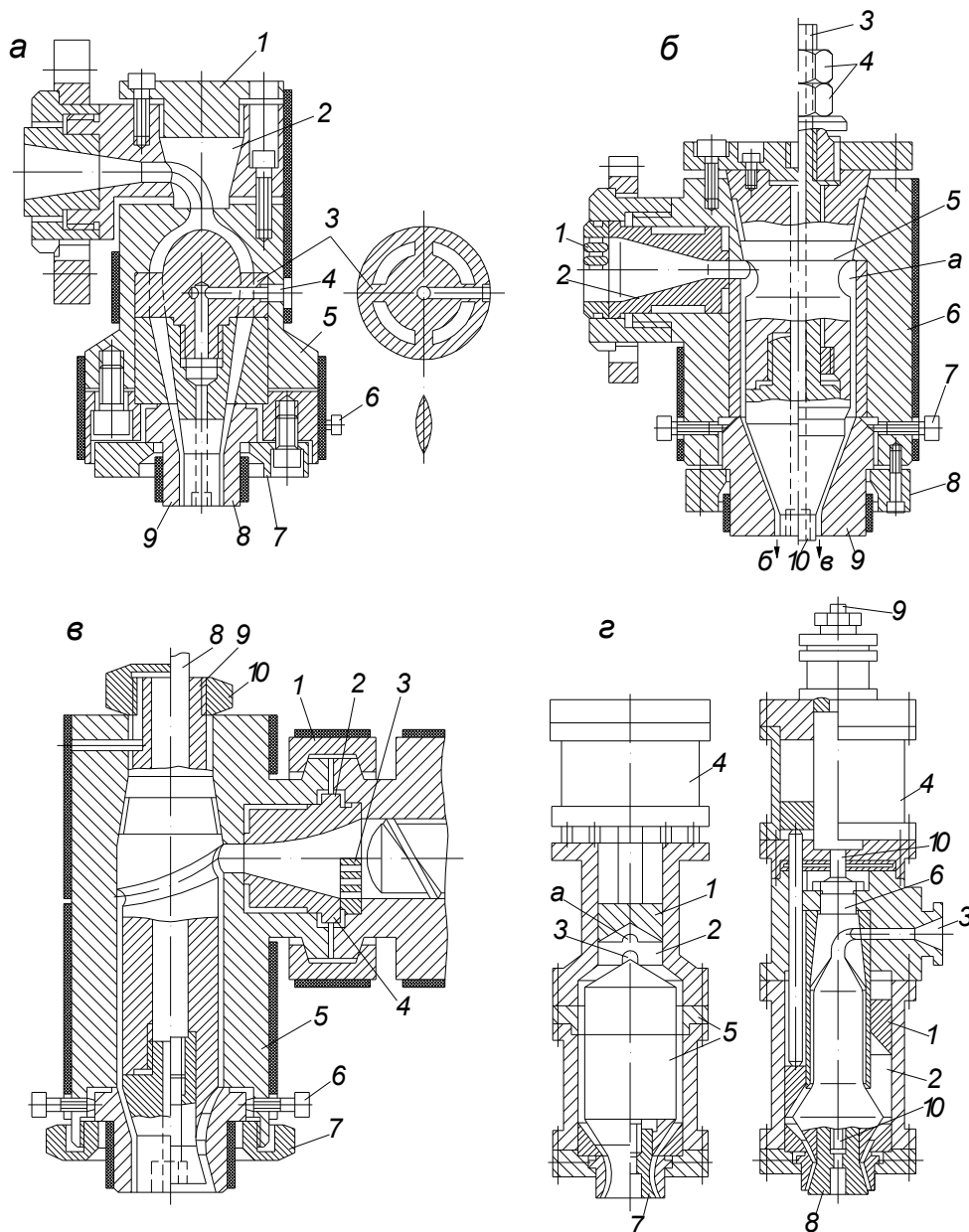


Рис. 14.6. Приклади конструкцій роздувних головок: головка *а*: 1 – притисна кришка; 2 – пробка; 3 – дорнотримач; 4 – канал для підведення повітря; 5 – корпус; 6 – регулювальні болти; 7 – фланець кріплення мунштука; 8 – дорн; 9 – мунштук; головка *б*: 1 – решітка; 2 – перехідник; 3 – шток рухомого дорну; 4 – контргайки; 5 – піноль; 6 – корпус; 7 – регулювальні болти; 8 – фланець кріплення мунштука; 9 – мунштук; 10 – дорн; головка *в*: 1 – фланець кріплення головки; 2, 4 – варіанти перехідника; 3 – решітка; 5 – корпус; 6 – регулювальні болти; 7 – притисна гайка мунштука; 8 – штанга для регулювання положення дорну; 9 – втулка напрямна; 10 – гайка кріплення пінолі; головки *г*, *д*: 1 – видавлювальний поршень; 2 – акумулювальна порожнина; 3 – вхід в головку; 4 – гідро- або пневмоциліндр приводу видавлювального поршня; 5 – дорнотримач із розсікачем потоку; 6 – піноль; 7 – дорн; 8 – дорн, рухомий в осьовому напрямі відносно пінолі; 9 – штанга приводу видавлювального поршня; 10 – шток переміщення дорну в осьовому напрямі

Чим більше час дії (менше лінійна швидкість виходу заготовки), чим більше маса (довжина заготовки й густина розплаву) і менше в'язкість розплаву, тим більше ступінь витончення, що призводить до різнотовщинності виробу, виготовленого з цієї заготовки.

Якщо різнотовщинність виробу стає занадто великою (більше 3–5 %), то потрібно застосовувати головки з акумулятором розплаву. У цьому разі розплав з екструдера подається спочатку в акумулятор, звідки спеціальним поршнем, що має гідро- або пневмопривід, видавлюється крізь формуючий зазор з потрібною швидкістю. Дві конструкції таких головок наведено на рис. 14.6, з, д. Головка, показана на схемі з працює в такий спосіб. При нижньому положенні видавлювального поршня 1 розплав з екструдера крізь отвір 3 подається в акумулювальну порожнину 2, підіймаючи поршень 1; при цьому витікання розплаву крізь формуючий зазор майже відсутнє внаслідок того, що тиск, який надається розплаву поршнем, набагато менший за опір формуючого каналу. При наборі в порожнині 2 необхідної дози, в циліндр 4 під тиском подається рідина або повітря, і відбувається екструзія заготовки крізь формуючий зазор. Головка, показана на схемі д, відрізняючись наявністю пінолі замість дорнотримача, працює так само, проте, незважаючи на більшу складність, вона надійніша в експлуатації, оскільки позбавлена застійних зон типу зони а в головці з.

Забезпечення достатньо рівнотовщинної по висоті заготовки ще не визначає однорідності товщини стінки майбутнього виробу. Під час роздування виробу ті частини перетину, що мають великий ступінь роздування, виявляються найбільш тонкими. Для отримання рівнотовщинного виробу заготовка повинна мати зміни товщини по висоті.

Одержання такої заготовки можливе, якщо висота щілини формуючого каналу на виході має можливість змінюватися за визначеною залежністю. Конструктивно зміна висоти формуючого каналу на виході можлива, якщо він не циліндричний, а конічний, як це показано на рис. 14.6, в. При осьовому переміщенні рухомого дорну відносно мундштука змінюється відстань між їх конічними вихідними зонами. Переміщення дорну здійснюється за допомогою штанги, пов'язаної з дорном і пропущеної крізь піноль назовні (рис. 14.6, в, поз. 8; д, поз. 10).

## **15. ДЕФЕКТИ ЕКСТРУДОВАНИХ ВИРОБІВ І СПОСОБИ ЇХ УСУНЕННЯ**

### **15.1. Усунення причин нестабільності процесу екструзії**

Коливання продуктивності екструдера є це найбільш поширеною проблемою процесу екструзії.

Нестабільності роботи екструдера, результатом яких є виникнення дефектів екструдату, за частотою утворення структурних елементів яких ці нестабільності можна поділити на п'ять типів:

1. Нестабільності високої частоти, за яких періодичність утворення структурних елементів дефектів перевищує частоту обертання черв'яка; ці нестабільності можуть бути наслідком таких чинників:

- огрубінням поверхні розплаву (ефект «акулячої шкіри»);
- коливанням частоти обертання черв'яка;
- низьким тиском в екструзійній головці;
- неоднорідністю температури розплаву в екструзійній головці.

2. Нестабільності, за яких періодичність утворення структурних елементів дефектів збігається з частотою обертання черв'яка; ці нестабільності можуть бути наслідком биття черв'яка.

3. Нестабільності низької частоти, за яких періодичність утворення структурних елементів дефектів приблизно в 5–10 разів менша за частоту обертання черв'яка; ці нестабільності можуть бути наслідком таких чинників:

- недостатньою здатністю екструдера до плавлення полімеру;
- порушенням безперервності живлення екструдера полімером.

4. Дуже повільні флуктуації з частотою в декілька хвилин, спричинені, наприклад, коливанням температури черв'яка й робочого циліндра.

5. Випадкові коливання, які можуть бути наслідком таких чинників:

- порушенням подачі сипкого матеріалу із завантажувального бункера;
- порушенням транспортування твердого матеріалу в екструдері.

Високочастотні нестабільності часто пов'язують з такими проявами нестабільності течії розплаву в екструзійній головці як порушення суцільності потоку, ефект «акулячої шкіри», «апельсинова шкірка» та ін.

Ефект «акулячої шкіри» проявляється в періодичному огрубінні поверхні екструдату у вигляді появи дрібних рифів. Менш різка форма дефекту проявляється у вигляді матовості поверхні, коли не вдається досягти її глянцю. «Акуляча шкіра» зазвичай формується в формуючій зоні головки або на виході з неї. Вважається, що ефект утворення «акулячої шкіри» спричинений прискоренням поверхневих шарів екструдату на виході полімеру з головки. Якщо швидкість витяжки екструдату надто висока, поверхневий шар полімеру може пошкоджуватися та утворювати характерні складки поверхні, схожі на шкіру акули. Такі чинники як швидкість зсуву, розміри фільтри, кути входу в фор-

муючу зону, чистота поверхні каналу, відношення довжини до діаметра формуючого каналу, матеріал деталей головки майже не впливають на появу цього дефекту.

Проблему зазвичай можна усунути, знижуючи швидкість екструзії, збільшуючи температуру в області формуючого каналу екструзійної головки, а також додаванням до полімеру зовнішніх мастильних матеріалів.

Порушення безперервності потоку розплаву – це серйозна деформація екструдату, яка може набувати різноманітної форми: спіральної, бамбукоподібної, регулярно хвилястої, випадкових розривів та ін. (рис. 15.1).

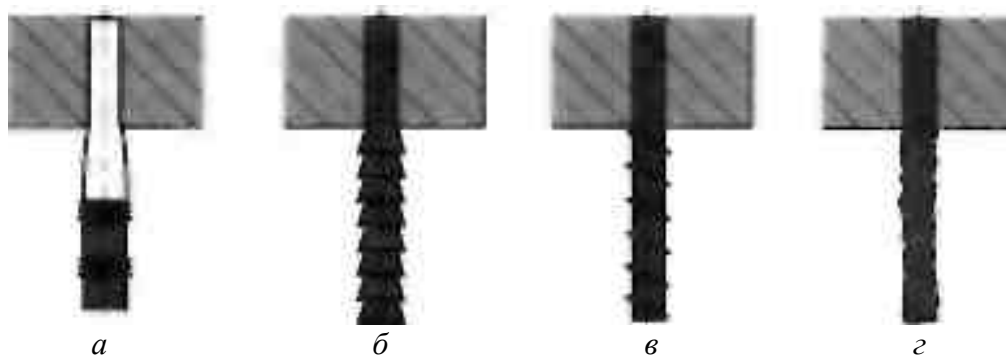


Рис. 15.1. Різні форми руйнування розплаву: *а* – періодичне проковзування; *б* – «стовбур пальми»; *в* – спіральне; *г* – хаотичне

Цей дефект, на відміну від поверхневого дефекту типу «акуляча шкіра», охоплює весь об'єм розплавленого екструдату.

Для пояснення порушення безперервності потоку розплаву був запропонований ряд механізмів, найбільш поширеними з яких є:

- критичне значення пружної деформації в зоні входу в філь'єру. У загальному випадку, чим менше кут входу в філь'єру з попередніх каналів більшого перерізу, тим вища швидкість деформації, за якої виникає нестабільність;
- критичне напруження пружної деформації. Порушення безперервності потоку розплаву починається, коли перевищується критичне значення напруження зсуву біля стінки, величина якого становить від 0,1 до 0,4 МПа;
- ефект періодичного проковзування розплаву в філь'єрі. Вище за певне критичне значення напруження розплав полімеру через втрату адгезії до стінки філь'єри починає періодично відриватися від стінки і ковзати по ній до вивільнення надлишкової енергії деформації, нагромадженої під час течії крізь філь'єру. Деякі дослідники припустили, що параметром, який відповідає за коливання тиску, є критичне значення деформації розтягування розплаву, що оцінюється мірою Генки.

Спотворення поверхні екструдату може бути зменшено або усунуто:

- згладжуванням каналів у головці;

– зменшенням напруження зсуву в формуючому каналі екструзійної головки, тобто роботою за напружень зсуву нижче за критичне значення, що спричинює руйнування розплаву, чого можна досягти підвищенням температури в формуючому каналі, роботою за більш низьких швидкостей, зниженням молекулярної маси або в'язкості полімеру;

– використанням процесингових домішок, що полегшують переробку матеріалу (компонентів, що знижують в'язкість, або зовнішніх мастил, наприклад, фторполімерних еластомерів для поліетилену);

– переходом до режиму суперекструзії, у якому екструдат не спотворюється за швидкостей, що перевищують умову порушення суцільності потоку.

Згладжування каналу течії в головці завжди корисно, але воно підвищує вартість формуючого інструмента. Для випуску великотоннажної продукції застосування максимально згладженою екструзійної головки зазвичай доцільне. Але для випуску дрібносерійної продукції це може бути економічно недоцільно.

Навіть якщо механізм нестабільності може бути до кінця і не зрозумілий, часто знижують нестабільність процесу такі заходи:

- зменшення швидкості обертання черв'яка;
- зниження температури черв'яка;
- зменшення температури на виході з робочого циліндра;
- зменшення глибини каната в зоні дозування;
- збільшення довжини зони стиснення;
- підвищення температури в перших зонах робочого циліндра (з боку завантаження сировини);
- збільшення тиску в головці.

## **15.2. Порожнини у виробках**

Дефекти у вигляді порожнин у тілі виробів може бути спричинені захопленням повітря, нерівномірним охолодженням, наявністю вологи, сторонніх домішок або летких компонентів, а також деструкцією полімеру.

Захоплення повітря – це досить поширена проблема під час екструзії, що виникає внаслідок потрапляння повітря в екструдер разом з частинками матеріалу із завантажувального бункера. За звичайних умов стискання твердих частинок матеріалу в зоні завантаження видавлює повітря з твердої фази. Проте в деяких випадках повітря не може повернутися в завантажувальний бункер і залишається в полімері до виходу з філь'єри. Тоді екструдат через бульбашки повітря, що містяться в ньому, зазвичай стає непридатним для формування виробів.

Існує декілька можливих рішень проблеми захоплення повітря. Насамперед, варто підвищити температуру в зоні завантаження і транспортування сировини, щоб забезпечити більш щільну упаковку твердих частинок матеріалу.

Наступним кроком може бути збільшення тиску в екструзійній головці для зміни профілю тиску по довжині екструдера, що дозволяє створити швидке ущільнення твердих частинок матеріалу. Тиск у головці може бути підвищений установкою фільтруючих сіток на решітці. Збільшення ступеню стиснення черв'яка також має зменшити ймовірність захоплення повітря. Інше можливе рішення – це встановлення дозатора для завантаження матеріалу в екструдер, проте це може призвести до зниження продуктивності екструдера.

Однією з можливостей, яку слід спробувати, є використання рифленої завантажувальної втулки в робочому циліндрі. Тиск у рифленій завантажувальній зоні створюється набагато швидше, ніж в гладкому циліндрі, що сприяє швидкому ущільненню твердих частинок матеріалу, а отже і зменшує ймовірність захоплення ними повітря. Замість рифлення робочого циліндра можна спробувати знизити тертя матеріалу по черв'яку, наприклад, застосуванням спеціальних покривів.

Захоплення повітря часто вдається уникнути в екструдерах з дегазацією.

Наступною причиною появи порожнин може бути занадто швидке охолодження екструдату після виходу з головки, супроводжуване його нерівномірною усадкою. У цьому разі потрібно застосувати такі заходи:

- знизити температуру розплаву в головці;
- збільшити відстань від філь'ери до охолоджувальної ванни або калібру;
- зменшити швидкість екструзії;
- підвищити температуру води в охолоджувальній ванні.

Порожнини в екструдованих виробах можуть бути також спричинені наявністю вологи або летких компонентів в матеріалі. Для усунення дефектів у цих випадках потрібно:

- підсушити матеріал перед завантаженням в екструдер;
- видалити леткі компоненти із сировини перед завантаженням в екструдер, наприклад, вакуумної сушкою;
- знизити температуру екструзії;
- використовувати екструдер з дегазацією.

Ще однією причиною виникнення подібних дефектів може бути деструкція полімеру, яку можна усунути такими заходами:

- знизити температуру сировини;
- зменшити час перебування матеріалу в екструдері;
- зменшити застійні зони в екструдері і головці;
- додати в сировину домішки-термостабілізатори і процесингові домішки, що знижують тертя матеріалу по поверхні формуючих каналів;
- перевірити поверхні черв'яка, циліндра й головки на наявність задирок, подряпин або потертості, на яких розплав може залипати і деструктувати;
- видалити речовини, які сприяють деструкції, зокрема вологу і повітря.

### 15.3. Проблеми гелеутворення

Перша проблема гелеутворення полягає в тому, що фахівці під словом «гель» або «гелік» мають на увазі різні поняття. В основі своєї гель – це видимий дефект, спричинений розходженням показника заломлення в полімерному продукті. У результаті процесів течії розплаву в екструдері гелі набувають вигляду витягнутих еліпсоїдів, які часто називають «риб'яче око». Поява гелів створює проблеми в тонкошарових продуктах: плівках, трубках, волокнах, оскільки вони можуть спричинити видимі дефекти. У товстошарових виробках гелі зазвичай не видні, а отже не розглядаються як проблема.

Причина появи гелів може бути різною: висока молекулярна маса матеріалу, утворення поперечних зв'язків (зшивання), деструкція, наявність забруднення матеріалу сторонніми домішками. Утворення зшивання зазвичай призводить до утворення витягнутих еліпсоїдів без точки в центрі. Пил і сторонні домішки, такі як каталізатор, неорганічні матеріали, домішки або дрібнодисперсні частинки із вторинної сировини зазвичай призводять до утворення гелів з точкою посередині (звідси і назва «риб'яче око»).

Зазвичай гелі – це молекули полімеру з високою молекулярною масою, з частково зшитих макромолекул, які можуть утворюватися в процесі полімеризації у виробника полімеру. Висока температура розплаву і тривалий час перебування – основні причини утворення гелів при екструзії.

При появі гелів у зекструдованому продукті важливо визначити, чи були гелі у використовуваній сировині або вони з'явилися в процесі екструзії. Один з методів перевірки, чи містить сировина гелі, – пресування тонкої пластини з гранул полімеру, вироблених постачальником, і візуальна перевірка пластини на наявність гелів. На жаль, позбутися їх за традиційного процесу екструзії дуже складно.

Утворення гелів під час екструзії можна уникнути, якщо запобігти появі застійних зон в екструдері. Досягти цього можна, якщо черв'як і екструзійна головка матимуть обтічні форми каналів. Також важливо, щоб поверхні черв'яка, робочого циліндра та екструзійної головки були гладкими, без задирок, подряпин або виїмок, у яких може збиратися розплав і деструктувати.

Також потрібно перевірити труби, крізь які надходить полімер, змішувачі, живильники, бункер та інші компоненти обладнання, по яких рухається матеріал, на потрапляння в них дрібнодисперсних частинок і сторонніх домішок.

### 15.4. Нарости матеріалу біля виходу з головки

Нарости матеріалу біля виходу з головки – це поширена проблема під час екструзії, що полягає в нагромадженні матеріалу безпосередньо на виході з головки (рис. 15.2). Нарости матеріалу на виході з філь'єри можуть призвести до утворення ліній на зекструдованому продукті. Утворення наростів може

бути наслідком поганої сумісності компонентів суміші, наявністю газів або вологи в розплаві, деструкцією чи поганим диспергуванням наповнювачів або функціональних домішок.

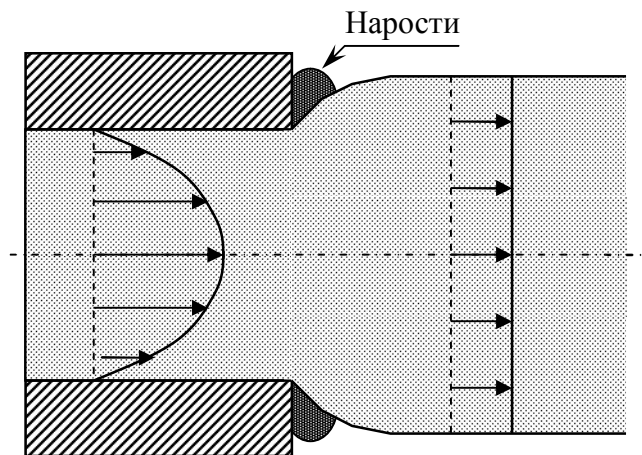


Рис. 15.2. Схема утворення наростів на виході з філь'єри

Утворення наростів може бути зменшено заміною матеріалу, технологічного режиму екструзії або зміною конструкції головки.

При зміні матеріалу для зниження утворення наростів потрібно:

- видалити несумісний компонент;
- додати процесингові домішки;
- додати речовину, що поліпшує сумісність;
- змінити режим змішування компонентів.

У разі зміни режимів технологічного процесу для зниження утворення наростів рекомендується:

- відрегулювати (зазвичай зменшити) температуру в головці;
- застосувати обдув повітрям виходу з головки;
- використовувати скребок на виході з головки для механічного видалення наростів.

Зміна конструкції філь'єри для зниження утворення наростів передбачає:

- використання покриття філь'єри матеріалом з низьким коефіцієнтом тертя;
- застосування філь'єр з більш довгої форми каналом;
- зменшення кута входу в філь'єру.

Також потрібно перевірити стан внутрішніх поверхонь філь'єри: усунути подряпини, пошкоджені покриття, дрібні виїмки, поліпшити загальний стан поверхні. Цікаво відзначити, що деякі із заходів, прийнятих для зменшення утворення наростів на філь'єрі, також сприяють і усуненню порушень суцільності течії розплаву, наприклад, застосування процесингових домішок.



## 15.5. V-або W-подібні лінії

Утворення V-або W-подібних поздовжніх ліній часто пов'язане з напруженнями розтягу, а точніше з нерівномірністю цих напружень. Стрілоподібні смуги можуть бути пов'язані також з нерівномірним виходом розплаву з філь'єри екструзійної головки. У цьому разі потрібно перевірити конструкцію філь'єри й переконаватися в рівномірному розподілі температури розплаву в напрямку екструзії і в поперечному напрямку. У деяких випадках перед колектором головки може бути встановлений статичний змішувач, який поліпшує гомогенність розплаву безпосередньо перед входом в колектор.

## 15.6. Сторонні вкраплення і зміна кольору

Сторонні вкраплення можуть представляти точки чорного, коричневого, жовтого або будь-якого іншого кольору, що відрізняється від кольору основного матеріалу. Найчастіше вкраплення спричиняються наявністю сторонніх домішок, деструкцією або продуктами зносу обладнання. Деструкція може проявлятися у зміні кольору, наявності вкраплень, голчастих отворів, виділення летких речовин (появі димка) або в зміні фізичних властивостей екструдату.

Для визначення причини появи вкраплень і зміни кольору потрібно перевірити:

- наявність сторонніх домішок в матеріалі;
- наявність областей високих температур;
- наявність застійних зон;
- термостабільність полімеру (її можна поліпшити введенням стабілізатору);
- наявність сторонніх частинок від продуктів зносу обладнання.

Зазвичай деструкцію можна зменшити такими заходами:

- знизити температури по зонах екструдера;
- знизити час перебування матеріалу в екструдері;
- виключити присутність речовин, що сприяють деструкції, наприклад, кисню;
- додати термостабілізатор або поліпшити його ефективність.

Неоднорідність кольору може бути спричинена поганим змішуванням в екструдері, нерівномірним введенням домішок або концентрованих барвників, проблемами сумісності між вихідною сумішшю і барвником. Змішування може бути поліпшене за рахунок удосконалення змішувальної здатності черв'яка екструдера.

## 15.7. Зварні шви

Лінії в зекстурдованому продукті можуть з'являтися у вигляді зварних швів, коли потік розплаву полімеру поділяється і потім з'єднується знову. Зварні лінії називають також лініями стику. Вони можуть з'являтися під час

виробництва труб, а також в разі використання будь-яких кільцеподібних головок, у яких дорн-осердя утримується опорами дорнотримача. Потік розплаву полімеру на вході в головку розділяється опорами і знову з'єднується після проходження опор. Через обмежену рухливість довгих макромолекул їм потрібен певний час для утворення нових зачеплень. Цей процес називають також «заліковуванням» дефектів.

Якщо час перебування більше часу «заліковування» дефектів, зварний шов зникне під час проходження розплаву крізь головку, і дефектів в екструдаті не буде. Однак, якщо час перебування менше часу «заліковування» дефектів, зварений шов не зникне, і на зекстурованому продукті з'являться лінії стику. Проблему появи зварних швів можна знизити або усунути, збільшивши час перебування в філь'єрі або зменшивши час заліковування розплаву полімеру.

Час перебування розплаву в філь'єрі можна збільшити, знижуючи швидкість течії (продуктивність екструдера) або змінюючи геометрію екструзійної головки. Розсікач потоку потрібно розміщувати якнайдалі від виходу з головки. Деякі геометричні форми головки дають змогу знизити утворення зварних швів, наприклад, при використанні дорна зі спіральним розподільником розплаву в трубних головках або головках для виготовлення рукавної плівки. У таких головках вдається значною мірою вирішити проблему утворення ліній стику. У головках з обертовим дорном для виготовлення труб та інших кільцеподібних виробів також можуть ефективно розмиватися зварні шви. Деякі головки мають спеціальні розширені зони релаксації для «заліковування» дефектів. Зони релаксації – це локальні області в головці з збільшеним поперечним перерізом каналу.

Зниження молекулярної маси полімеру прискорює процес релаксації. Більш висока температура розплаву також підвищує рухливість молекул полімеру і знижує час «заліковування» дефектів. Важливу роль відіграє і будова молекул полімеру. Макромолекули лінійних полімерів легше орієнтуються і в результаті повільніше повертаються в початковий стан у результаті з'єднання двох окремих потоків.

## 16. КАЛІБРУВАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ

Калібрувальні пристрої застосовують у процесах екструзії, де вони виконують такі основні функції:

- фіксацію конфігурації погонажного виробу після виходу з головки;
- корекцію форми виробу, що виходить із головки;
- забезпечення потрібної точності розмірів і форми поверхонь виробу.

Калібрувальні пристрої встановлюються відразу за головкою з мінімальним повітряним зазором.

### 16.1. Класифікація калібрувальних пристроїв

Калібрувальні пристрої класифікують за такими ознаками:

1) За типом поверхні, що піддається калібруванню: внутрішні й зовнішні.

Частіше застосовуються зовнішні, тому що в більшості випадків ці поверхні є такими, що сполучаються або лицевими.

2) За способом притиску до формуючої поверхні:

- з природним притиском під впливом власної ваги;
- з примусовим притиском за допомогою стислого повітря, вакууму;
- з примусовим притиском механічним способом за допомогою пружин, вантажів і т.д.;
- при внутрішньому калібруванні – за допомогою теплової усадки, витяжки.

При цьому важливо не допустити, щоб зусилля притиску було надмірним, інакше профіль буде заклинювати на поверхні калібру.

3) За способом охолодження профілю в калібрувальних пристроях: при контакті з охолоджуваною поверхнею калібру; при контакті безпосередньо з холодагентом; комбінований.

4) За конструктивним типом калібрувального пристрою: монотонний канал; монотонний стрижень; набір пластин з отворами, відповідними поперечному перерізу виробу; профільні ролики; тракові пари.

Приклади конструктивного виконання калібрувальних пристроїв наведено на рис. 16.1.

Охолодження в калібрувальних пристроях має бути достатнім для утворення шару затверділого полімеру, необхідного для підтримки форми виробу за його подальшого охолодження під дією внутрішніх напружень, перепаду тиску, тягнучого зусилля і т.д.

Для вибору технології виробництва труб і кабелів необхідно знати зовнішній діаметр  $D$ , внутрішній  $d$  або товщину полімерного шару  $\delta$ , а для профілів – ширину і висоту. Тиск розплаву в головці досягає 30 МПа.

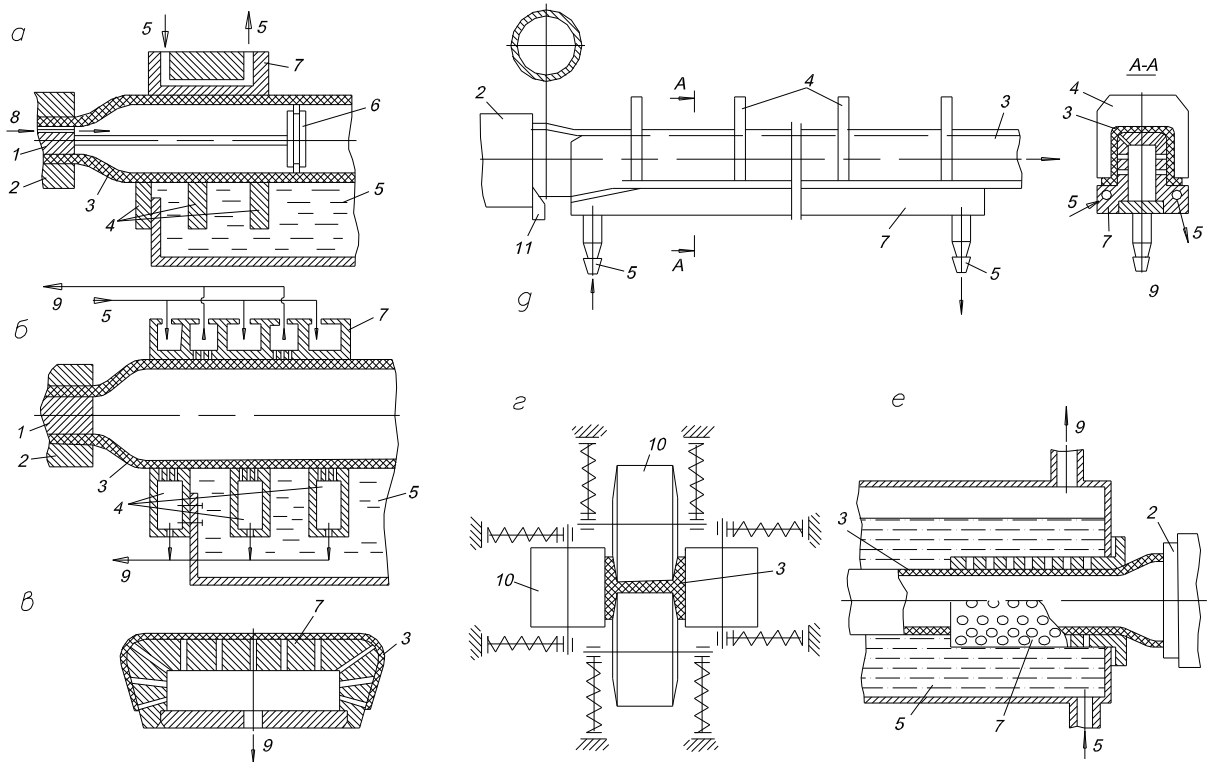


Рис. 16.1. Варіанти конструкцій калібрувальних пристроїв: *а* – зовнішнє калібрування стислим повітрям; *б* – зовнішнє калібрування замкнутого профілю вакуумом; *в* – внутрішнє калібрування незамкнутого профілю вакуумом; *г* – калібрування роликами; *д* – комбінований калібрувальний пристрій; *е* – зовнішнє калібрування труби у вакуумній ванні з перфорованою втулкою; 1 – дорн; 2 – мундштук; 3 – виріб; 4 – діафрагми; 5 – охолоджуюча вода; 6 – пробка; 7 – калібрувальний елемент; 8 – повітря під тиском; 9 – вакуум; 10 – ролики; 11 – ніж для розрізування трубчастої заготовки

З урахуванням розбухання розплаву на виході з головки площа формуючого зазору головки для екструзії труб має бути на 10–15 % менше від площі поперечного перерізу труби  $S$ . Після калібрування діаметр труби дорівнює діаметру насадки  $D_{\text{нас}}$ , і збільшується на 10–25 %; при цьому товщина стінки зменшується, тобто  $D_{\text{нас}} > D_{\text{м}}$  мундштука або зовнішнього діаметра кільцевого зазору формуючої частини головки.

Після виходу з насадки номінальний зовнішній діаметр труби  $D_{\text{ном}}$  буде трохи менше внутрішнього діаметра насадки ( $D_{\text{нас}}$ ) через невелику термічну усадку ( $v_p$ )

$$D_{\text{нас}} > D_{\text{ном}} / (1 - v_p)$$

Після остаточного охолодження у ванні  $D_{\text{ном}}$  зменшується ще на 3–5 %.

Довжина охолоджувальної частини насадки ( $L$  на рис. 16.2) має дуже важливе значення для всього процесу з таких причин:

- варто уникати швидкого охолодження труби-екструдату, щоб звести до мінімуму нерівномірність усадки й попередити утворення порожнин та інших дефектів у стінці труби, а також зменшити залишкові напруження;
- довжина насадки залежить від розмірів, властивостей полімеру, температури розплаву на виході з головки й швидкості виходу екструдату;
- довжина насадки має бути достатньою (за всіх інших умов екструзії) для охолодження труби до моменту фіксації її геометричних розмірів і мати достатню формостійкість при потраплянні у ванни остаточного охолодження;
- підвищена довжина насадки призводить до збільшення сили тертя між її поверхнею й нерухомою поверхнею насадки, тобто до збільшення зусилля відведення труби, а в крайньому випадку – до необоротного деформування труби в насадці.

Для виробництва труб і шлангів застосовують два види калібрування: по зовнішньому й по внутрішньому діаметру виробу. Для калібрування профілів використовують вакуумні насадки або охолоджувані водою профільні насадки.

На рис. 16.2 показано схему калібрування труби по зовнішньому діаметру. Це трубна оболонка 5, у яку через штуцер подається холодна вода. Внутрішня поверхня насадки хромована й полірована. Ця насадка прикріплюється до головки через термоізоляційне кільце 2. У трубу надходить стиснене повітря крізь канали в дорні головки. Щоб підтримувати необхідний тиск повітря всередині труби-заготовки, у ній розміщують кілька ковзних пробок (поз. 7 на рис. 16.2) з гумовими манжетами. Пробки закріплюють тросом 6 до дорна головки.

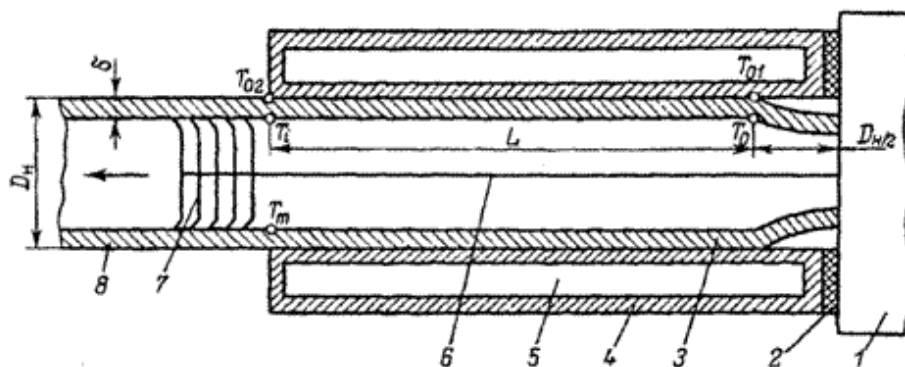


Рис. 16.2. Схема калібрування труби по зовнішньому діаметру із застосуванням внутрішнього тиску: 1 – трубна головка екструдера; 2 – термоізоляційне кільце; 3 – екструзійна трубна заготовка; 4 – пустотіла калібрувальна втулка; 5 – водяна сорочка; 6 – трос; 7 – ковзні пробки; 8 – калібрована труба.  $D_n$  – зовнішній діаметр труби;  $\delta$  – товщина стінки труби;  $L$  – довжина охолодної зони;  $T_0$  й  $T_1$  – температури на вході в насадку й на внутрішній поверхні труби;  $T_m$  – середня температура стінки труби на виході з насадки;  $T_{01}$  і  $T_{02}$  – температури внутрішньої поверхні насадки на початку й кінці контакту з трубою

Для калібрування труби по внутрішньому діаметру застосовують перфоровану насадку, охолоджувану водою і з'єднану з лінією розрідженого повітря. Насадка, розміщена всередині труби, розділена на три зони. У першу подається охолоджена вода, у другу підводять вакуум, де й відбувається калібрування. У цій зоні калібрована насадка перфорована. У третій зоні відбувається охолодження зкаліброваної труби. Передня частина насадки розточена на конус. Насадка перебуває всередині трубної заготовки, яка її обтікає, надіваючись як панчоха. Внутрішнім калібруванням можна одержувати труби квадратного, трикутного, овального та інших поперечних перерізів.

Найбільший вплив на властивості труб, профілів, шлангів чинить така стадія технологічної схеми виробництва, як калібрування з одночасним частковим охолодженням. Екструдат, що виходить з формуючої щілини під час калібрування, деформується, і одночасно здійснюється фіксація структури полімеру, що перебуває поблизу холодної поверхні калібрувального пристрою.

У разі калібрування труб по зовнішньому або внутрішньому діаметру заготовка деформується під час радіального розтягування. Залежно від збільшення діаметра заготовки фіксуються («заморожуються») залишкові напруження орієнтованих молекулярних ланцюгів або на зовнішній, або на внутрішній поверхні.

Якщо роздув заготовки великий, то зафіксована орієнтація ланцюгів виявиться під час експлуатації труб за підвищених температур: труба деформується необоротно. Те саме, але в поздовжньому напрямку, відбувається за значної витяжки розплаву тягнучим пристроєм. Отже, під час калібрування потрібно прагнути якнайменше деформувати заготовку в радіальному та осьовому напрямках. Останнє залежить від якості заготовки: чим більше різниця товщин, коливання зовнішнього або внутрішнього діаметра, тим більшою мірою необхідно деформувати заготовку під час калібрування. Оптимальний ступінь відносної деформації в радіальному напрямку для труб становить 10–20 %.

Швидке охолодження труби призводить до утворення значних напружень стиску. На рис. 16.3 показані епюри розподілу напружень по товщині труби, каліброваної по зовнішньому діаметру. Як видно з рис. 16.3, зовнішні шари стиснуті, а внутрішні розтягнуті. Ці так звані залишкові, або «заморожені», напруження негативно проявляються зазвичай під час випробувань, але частіше – під час експлуатації, тому вироби з більшими залишковими напруженнями мають значно меншу довговічність.

На рис. 16.4 представлена зміна руйнівного напруження  $\sigma_r$  від деформуючого тиску повітря  $P$  при калібруванні труби. При збільшенні  $P$  відстань  $D_H/2$  (див. рис. 16.2) зменшується, швидкість деформування екструдату збільшується й, отже, збільшується інтенсивність охолодження

поверхні напівфабрикату, тобто величина  $P$  побічно вказує на зростання залишкових напружень. Чим вони вище, тим менше  $\sigma_p$  (див. рис. 16.4). З підвищенням залишкових напружень довговічність виробів різко знижується.

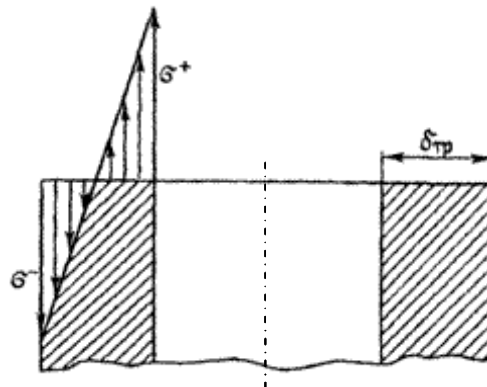


Рис. 16.3. Епюри розподілу залишкових напружень по товщині труби, виготовленої в результаті калібрування по зовнішньому діаметру

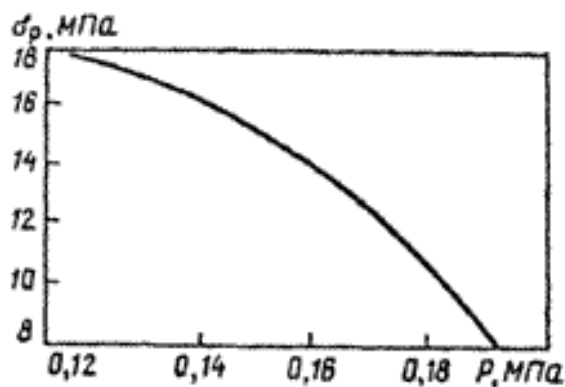


Рис. 16.4. Залежність руйнівного напруження від надлишкового тиску повітря під час калібрування труби за схемою, наведеною на рис. 16.2

Зі збільшенням температури екструдату умови для релаксації напружень поліпшуються, однак перепад температур між поверхнею труби й каліброваного пристрою також росте. Чим вище перепад температур, тим більше ймовірність утворення залишкових напружень. Якщо при цьому збільшити й температуру поверхні калібрувальної насадки, то відбудеться найбільш повна релаксація внутрішніх напружень. Довговічність виробів збільшується. Однак у цьому випадку необхідно збільшити довжину калібрувальної насадки.

## 16.2. Розрахунок калібрувального пристрою

Під час роботи калібрувального пристрою мають виконуватися умови міцності заверділого шару полімерного виробу від дії внутрішнього тиску [5]

$$\frac{PD}{2\delta} \leq [\sigma]; \quad (16.1)$$

а також від тягнучого зусилля

$$\frac{N}{\Pi\delta} \leq [\sigma]; \quad (16.2)$$

де  $P$  – тиск повітря, Па,  $D$  – зовнішній діаметр труби, м,  $N$  – тягнуче зусилля, Н,  $\Pi$  – периметр поперечного перерізу виробу по зовнішній поверхні, м;  $\delta$  – необхідна товщина отверділого шару.

З іншого боку, калібрувальний пристрій має забезпечити за час перебування виробу в ньому охолодження його поверхневого шару до затвердіння.

Для визначення взаємозв'язку  $T$ – $L$  напишемо рівняння теплопровідності

$$\frac{V\partial T}{\partial x} = \frac{a\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (16.3)$$

де  $a$  – температуропровідність, м<sup>2</sup>/с,  $x$  і  $y$  – координати, м (див. рис. 16.5).

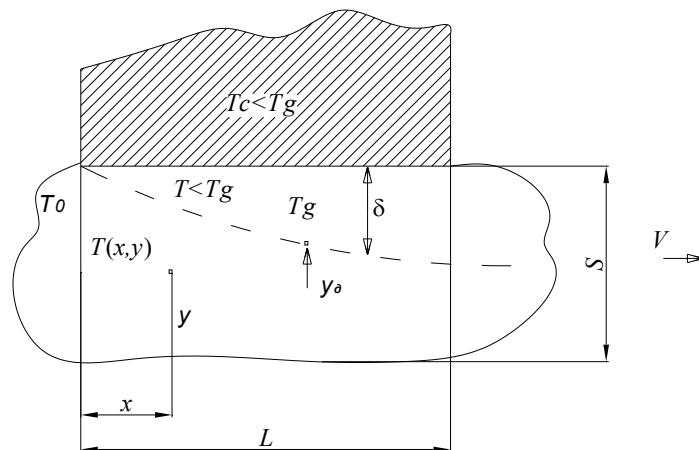


Рис. 16.5. Розрахункова схема калібрувального пристрою:  $T_g$  – температура склування;  $T_0$  – температура на вході в калібрувальний пристрій;  $T_c$  – температура стінки

Розв'яжемо це рівняння за таких граничних умов:

$$T|_{x=0} = T_0; \quad T|_{y=s} = T_c; \quad \frac{\partial T}{\partial y}|_{y=0} = 0,$$

де  $T_0$  – температура на вході в калібрувальний пристрій, °С;  $T_c$  – температура стінки, °С.

Розв'язанням рівняння (16.3) є формула:

$$\frac{T(x, y) - T_c}{T_0 - T_c} = \frac{4}{\pi} \cos\left(\frac{\pi y}{2s}\right) e^{-\frac{gx}{v}}; \quad g = 2,5 a/s^2, \quad (16.4)$$

де  $v$  – швидкість протягування профілю, м/с;  $s$  – товщина профілю, м.



Оскільки на поверхні розділу твердої і рідкої фаз  $T = T_g$ , а для  $x = L$   $y = 0$ , то підставивши їх у формулу (16.4), отримаємо

$$L = \frac{v}{g} \ln \left[ \frac{4}{\pi} \left( \frac{T_g - T_c}{T_0 - T_c} \right) \cos \left( \frac{\pi}{2} \frac{s - \delta}{s} \right) \right]. \quad (16.5)$$

Величина тягнучого зусилля

$$N = F_3 + F_{mp},$$

де  $F_3$  – зусилля на вході в калібрувальний пристрій, спричинений деформацією профілю,  $H$ ,  $F_{mp}$  – сила тертя профілю об стінки,  $H$ :

$$F_{mp} = f \Pi L_n P.$$

Отже

$$N = F_3 + f \Pi L_n P. \quad (16.6)$$

Розв'язуючи разом (16.2) і (16.6), отримаємо обмеження на довжину калібрувального пристрою за умови міцності

$$L_n \leq \frac{\Pi \delta [\sigma] - F_3}{f \Pi P}.$$

З іншого боку має виконуватися нерівність  $L_n \geq L$  з виразу (16.5).

Якщо ці умови не мають області перетину, то потрібно зменшити швидкість протяжки, що небажано, тому що знижує продуктивність, або змінювати конструкцію калібру для інтенсифікації тепловіддачі.

## 17. ФОРМИ ДЛЯ РОЗДУВНОГО ФОРМУВАННЯ

Форми для отримання порожнистих виробів методом роздуву трубчастих заготовок або преформ містять такі обов'язкові системи:

- 1) формоутворювальні деталі (півматриці, знаки);
- 2) систему прес-кантів;
- 3) систему охолодження;
- 4) систему вентиляції;
- 5) напрямну систему

Необов'язкові системи:

- 1) система виштовхування;
- 2) система видалення ґрату (облою).

Застосовують три способи роздування заготовки: крізь дорн, ніпель або голку. На практиці зазвичай застосовують останні два способи.

Приклад форми для роздування ніпелем див. на рис. 17.1.

Така схема доцільна для виготовлення будь-яких виробів, якщо їхня горловина не занадто мала, щоб надягати на ніпель (тоді застосовують голку), і не занадто велика (тоді роздування проводять крізь дорн).

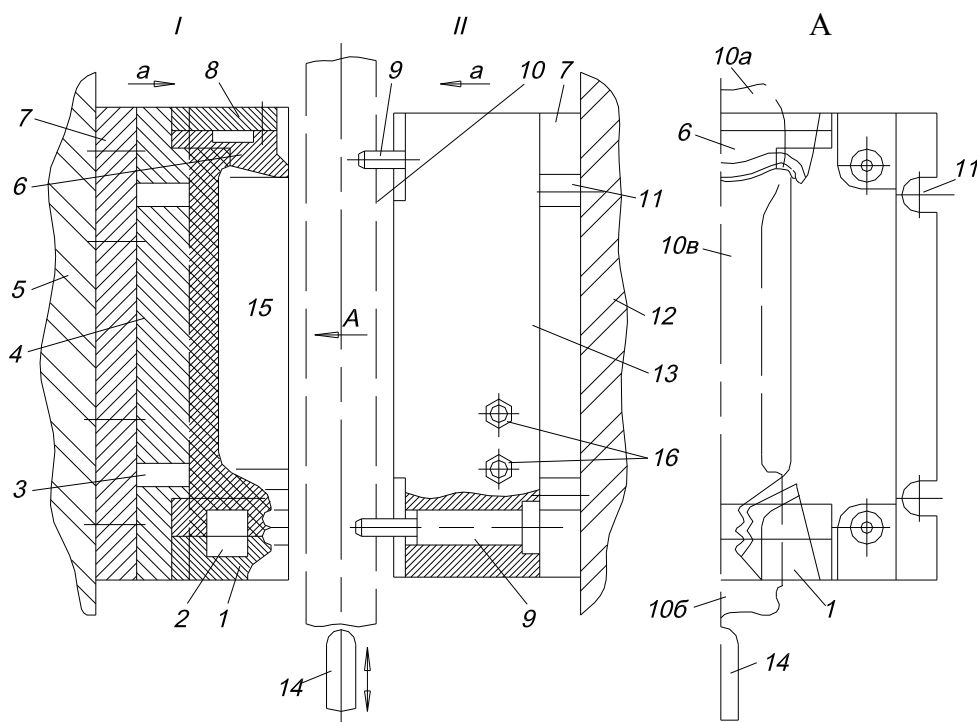


Рис. 17.1. Приклад форми для роздування через ніпель: 1 – нижній прес-кант;

2 – канал охолодження нижнього прес-канта; 3 – канал охолодження півматриці; 4, 13 – півматриці; 5, 12 – плити механізму змикання; 6 – верхній прес-кант; 7 – кріпильні плити півматриць; 8 – канал охолодження верхнього прес-канта; 9 – напрямні колонки; 10 – трубчаста полімерна заготовка; 11 – вушка кріпильних плит; 14 – ніпель; 15 – формуюча порожнина; 16 – штуцери каналу охолодження півматриці

Відношення діаметрів виробу й заготовки називають коефіцієнтом роздування

$$K = D / d_s \approx 2,5-3,5.$$

Тиск роздування зазвичай не перевищує 0,5 МПа. Тому напруження, що діє на деталі форм, невеликі, і їх можна виготовити не лише з інструментальних сталей, але і з силумінів, бронзи, латуні, полімерних композиційних матеріалів. Поверхня може бути отримана гальванопластикою. Півформи оснащують чотирма парами «втулка – колонка».

Перетиск трубчастої заготовки здійснюється верхніми й нижніми прес-кантами (див. рис. 17.1, поз. 1, 6). Це найбільш навантажені елементи форми, тому їх виготовляють з інструментальних сталей з твердістю HRC 50–55.

Основним робочим органом прес-канта є відтискна крайка. Зазвичай відрізок облою при змиканні не допускають, тому що це істотно ослаблює місця стику (рис. 17.2).

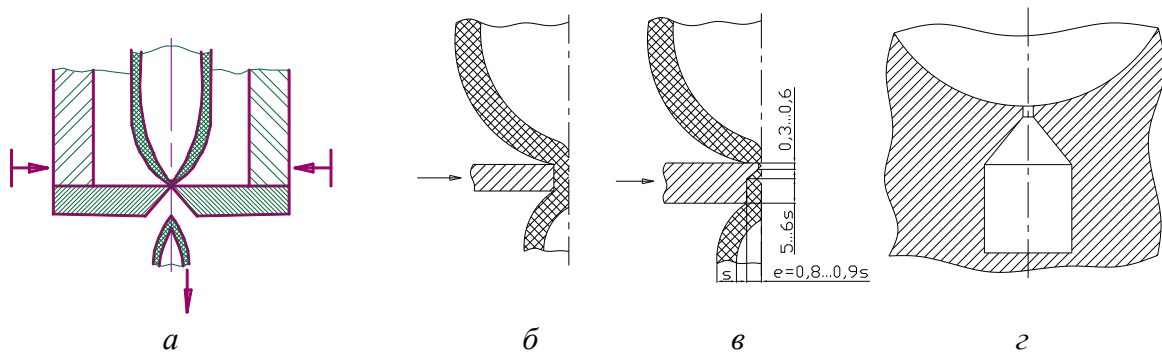


Рис. 17.2. Перетиск трубчастої заготовки: а – неправильно; б – напівправильно; в – правильно; г – перетиск навколо горловини

Під час змикання між крайками виникають напруження  $\sigma_{ст} \approx 3$  МПа, а в карманах – близько 0,4 МПа.

Місце стику та облой охолоджують інтенсивніше за решту ділянок, тому прес-канти споряджають власною системою охолодження.

Системи охолодження виконані безпосередньо в півматрицях або в спеціальних плитах охолодження у вигляді свердлених, заформованих каналів або у вигляді порожнин. Воду можуть подавати суцільним потоком або з розбризкуванням (див. рис. 17.2).

Оскільки тиск роздування значно менше, ніж під час лиття під тиском, а об'єм розплаву менше за об'єм форми, необхідно передбачити відведення повітря з порожнини форми. Якщо поверхня виробу не повинна бути глянсовою, то відведення повітря може відбутися природним шляхом через мікронерівності на поверхні півформ. Часто їх спеціально обробляють для надання рівномірної дрібної шорсткості, наприклад піскоструминною обробкою.

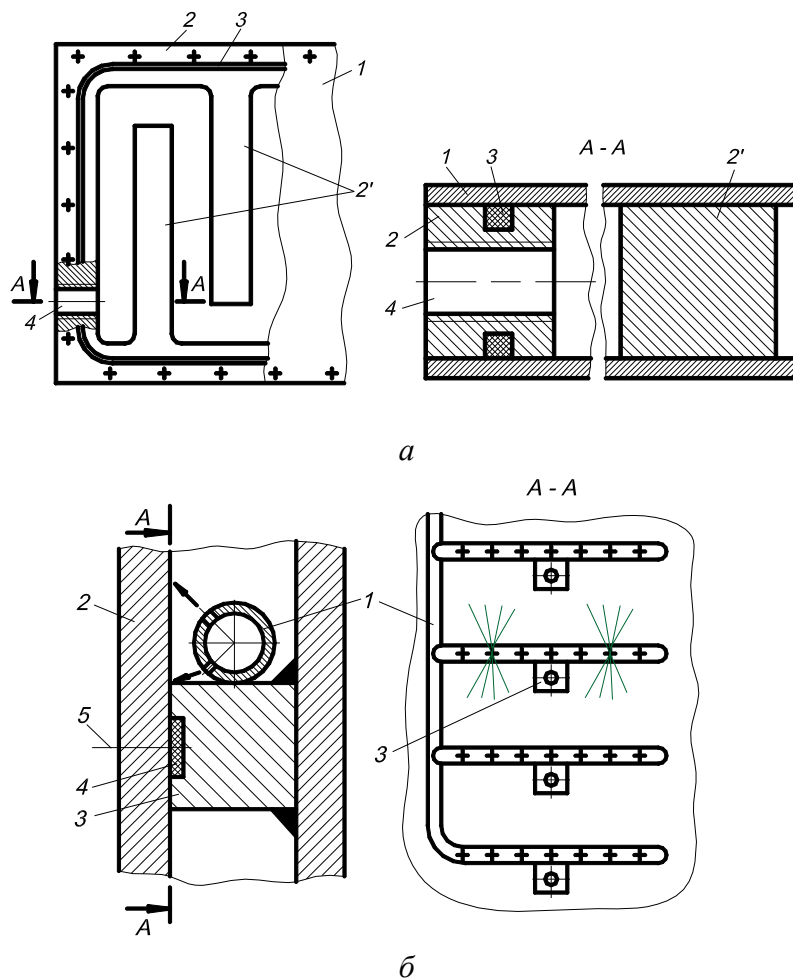


Рис. 17.2. Охолоджувальні плити: *а* - із суцільним потоком охолоджуючої рідини (1 – кришки; 2 – фігурна плита з перемичками 2'; 3 – ущільнення; 4 – отвір підведення охолоджуючої рідини); *б* - із розбризкуванням охолоджуючої рідини (1 – трубка з отворами; 2 – кришка плити, прилегла до форми; 3 – проставка; 4 – ущільнення; 5 – гвинт кріплення кришки до проставки)

У формах для одержання виробів з глянцевою поверхнею природна вентиляція неможлива, тому на поверхнях змикання 1 (див. рис. 17.3,а) виконують спеціальні вентиляційні канали 2. Висота каналів складає 0,1–0,3 мм, ширина – 5–30 мм залежно від габаритів виробу й товщини заготовки. Для зниження гідравлічного опору виконують дренажний канал 3 на відстані 4–10 мм від формуючої порожнини 4. Крізь канали 5 повітря виходить в атмосферу. Переріз каналів 4 і 5 набагато перевищує переріз вентиляційних каналів 2, тому їх опір малий. У формах з полірованою поверхнею вентиляційні канали виконують не лише на поверхнях змикання, але і в тілі форми (рис. 17.3,б). Наприклад, на поверхні 1 стику прес-канта 2 і півматриці 3 виконують кільцевий зазор 4 величиною 0,1–0,2 мм з дренажним каналом 5 і відповідним каналом 6. У тупиковому кутку виконують циліндричні канали 7

мінімальної довжини, які переходять далі у відведення. У тіло матриці можуть вводитися спеціальні вставки 8 з шестигранним хвостовиком 9 або прямокутним 13, що створює з циліндричним отвором матриці вентиляційні щілини 10, сполучені з дренажним 11 і відвідним 12 каналами.

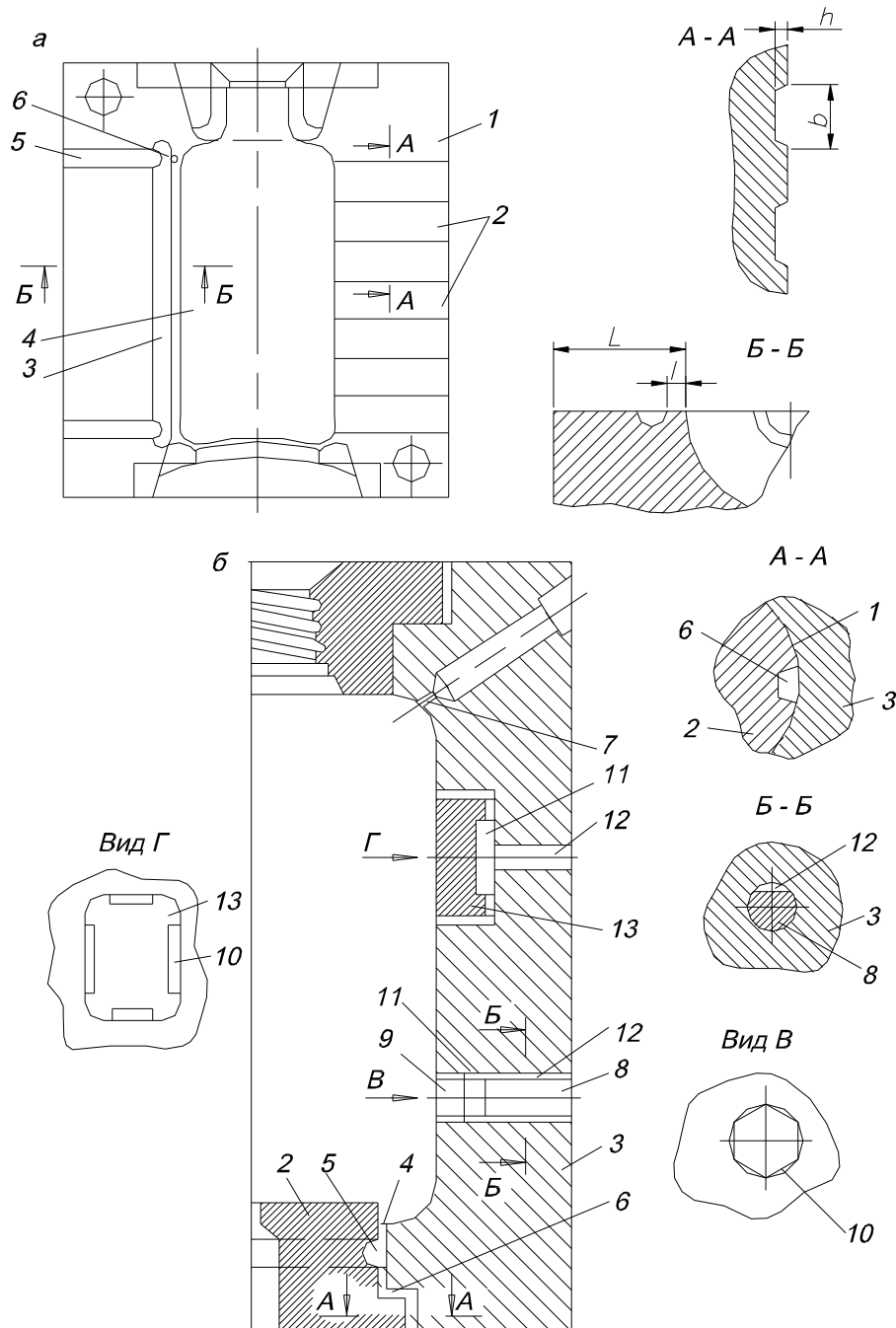


Рис. 17.3. Конструктивне оформлення вентиляційної системи

В'язкість розплаву досить велика, тому поверхня виробу не повторює дрібні нерівності на поверхні форм.

## 18. ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПНЕВМО- ТА ВАКУУМФОРМУВАННЯ

Методами пневмо- та вакуумформування можна виготовляти вироби відкритої форми завтовшки до 6–8 мм. Для переробки листів завтовшки понад 5 мм атмосферного тиску, який можна створити під час вакуумформування, недостатньо, тому застосовують пневмоформування за надлишкового тиску до 0,7–1,0 МПа. Якщо поверхня виробу має дрібний об'ємний малюнок, то пневмоформування застосовують і за товщини листа  $\delta$  до 5 мм.

Розрізняють два методи формування: негативний і позитивний. За негативного формоутворювальною деталлю є увігнута матриця, а зі позитивного – опуклий пуансон (див. рис. 18.1,а).

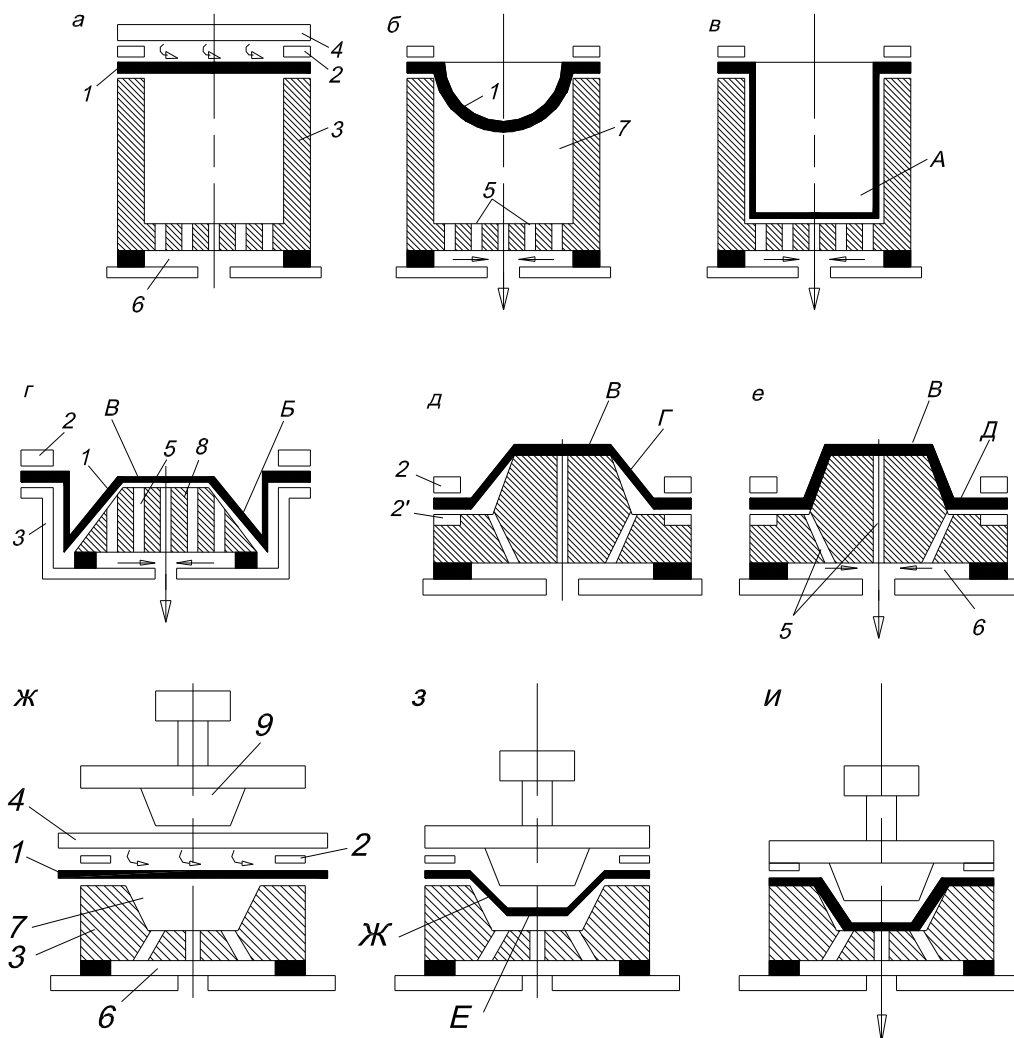


Рис. 18.1. Різновиди пневмовакуумформування: а–в – негативне формування; г – позитивне формування; д, е – позитивне формування з попередньою механічною витяжкою; ж–и – негативне формування з попередньою механічною витяжкою (1 – формований лист; 2 – притискна рама; 3 – матриця; 4 – нагрівник; 5 – вентиляційні канали; 6 – вакуумна порожнина матриці; 7 – формуюча порожнина; 8 – пуансон)

Форму може бути споряджено системою виштовхування. Для видалення частини листа, яка затискається в рамі, застосовуються вирубні штампи або спеціальні пристрої у складі форми. Форми із системою видалення облою й системою виштовхування можуть встановлюватися на пресах.

Вибір негативного або позитивного формування визначається тим, яка саме поверхня виробу має бути більш відповідальною. За відсутності таких вимог керуються тим, що шліфувати пуансон легше (зазвичай шліфують до Ra 0,1–0,025), але знімання з нього важче, а його знос більше.

Спосіб формування також впливає і на різновтовщинність виробу. За негативного формування найбільш тонкою частиною є нижні кути, а за позитивного – верхня крайка. Найменша різновтовщинність у виробів, отриманих з попередньою механічною витяжкою (рис. 18.1, д, ж).

Матеріалами для формоутворювальних деталей може бути дерево, гіпс, полімерні композиційні матеріали, кольорові метали, сталі, гальванополімерні конструкції. Гіпсові деталі можуть просочуватися реактопластичними смолами. Гіпсові й полімерні форми мають споряджатися вбудованою системою охолодження. Металеві форми при цьому встигають охолотитися природним шляхом. Приклади конструкцій форм для негативного й позитивного вакуумформування наведено на рис. 18.2.

Приклад конструктивного виконання форми для негативного вакуумформування ємкості з кришкою з попередньою витяжкою пуансоном наведено на рис. 18.3.

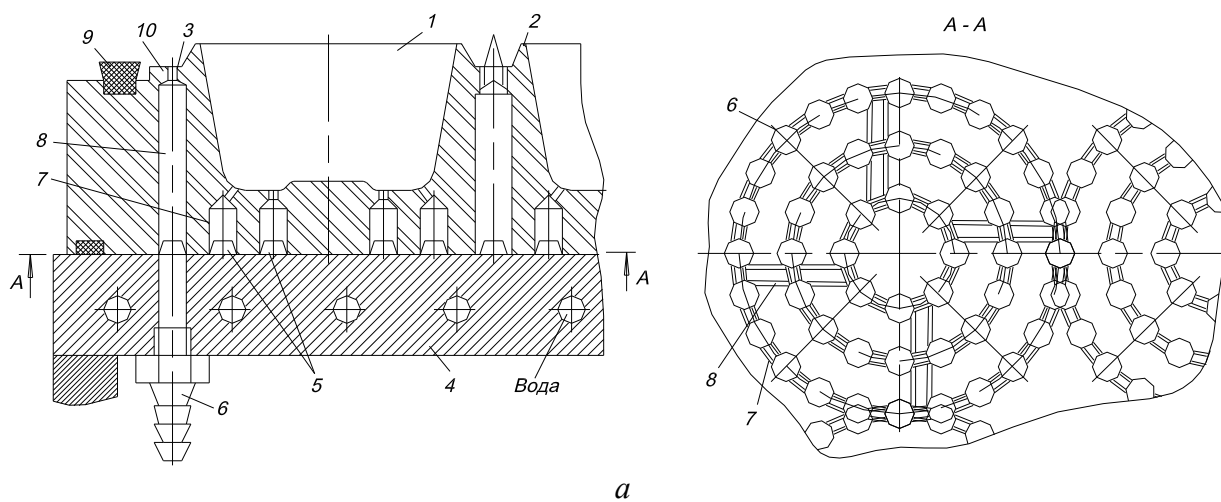
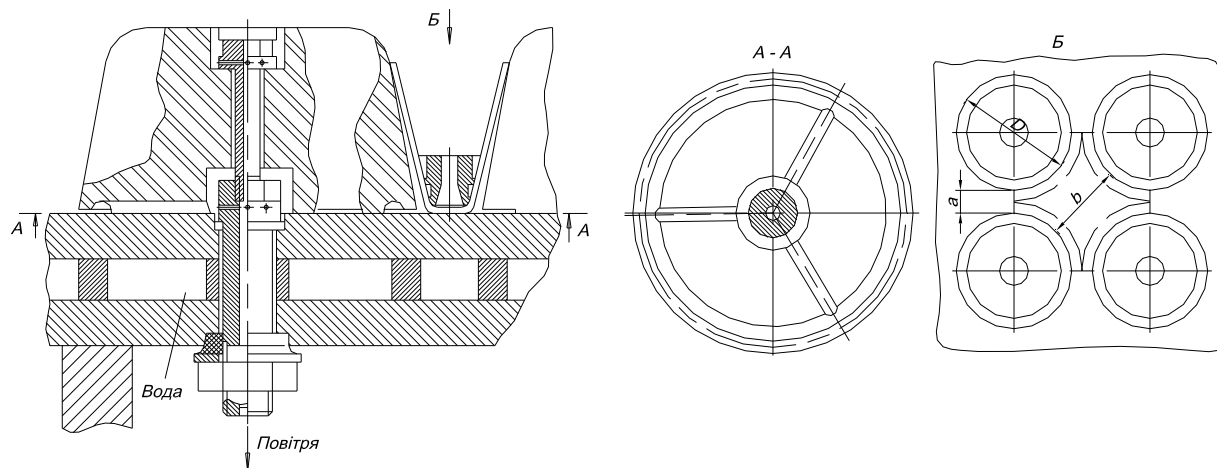


Рис. 18.2. Багатогніздова форма: а – для негативного вакуумформування, б – для позитивного вакуумформування (1 – формуюча порожнина; 2 – розділові канти; 3, 7 – вентиляційні канали; 4 – плита охолодження; 5, 8 – дренажні канали; 6 – ніпель; 9 – ущільнення притискної рами; 10 – вільна поверхня матриці)



б

Рис. 18.2: Закінчення. (Див. також с. 126)

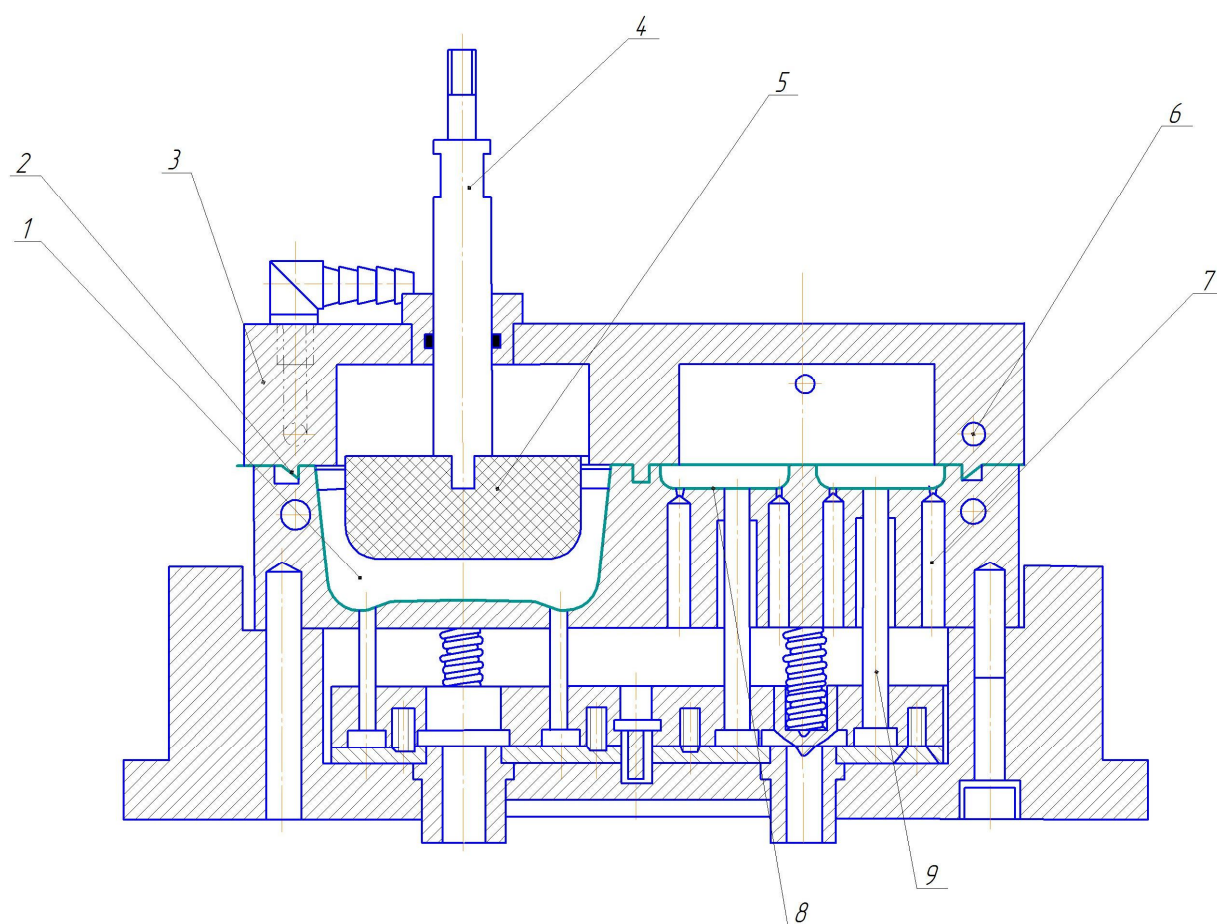


Рис. 18.3. Форма для негативного формування з передньою витяжкою:  
 1 – формуюче гніздо для ємкості; 2 – різальна кромка; 3 – притисна рама;  
 4 – шток; 5 – пуансон передньої витяжки; 6 – канал охолодження;  
 7 – повітряний канал; 8 – формуюче гніздо для кришки; 9 – виштовхувач



Для відведення повітря між поверхнею виробу й формою виконують вентиляційні канали у вигляді циліндричних отворів або щілин. Бажано їх розташовувати в найменш помітних місцях. Щілинні канали гідравлічно більш доцільні.

Довжина каналів має відповідати умові  $L_{\text{отв}} \leq (10 \dots 15)d$ .

Величина прогину полімерного листа у вентиляційному отворі (рис. 18.4) може бути обчислена за формулою

$$y = \frac{3}{16} \frac{P d^4}{E \delta^3} \frac{5 + \mu}{1 - \mu},$$

де  $E$  – модуль пружності полімеру під час розтягу за температури формування, Па,  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона полімеру за температури формування.

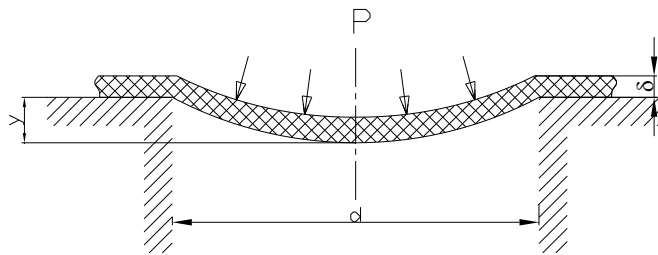


Рис. 18.4. Схема прогину листа заготовки у вентиляційному отворі

Звідси, задаючись значенням  $y$  з умови непомітності, можна визначити значення  $d$ .

Вентиляційні канали з'єднуються в дренажні з набагато більшим перерізом для зменшення загального гідравлічного опору.

## 19. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕЧІЇ РОЗПЛАВІВ ПОЛІМЕРІВ У ФОРМУЮЧОМУ УСТАТКОВАННІ

### 19.1. Загальні положення

Автоматизоване моделювання процесів течії розплавів полімерів у робочих каналах базового та формуючого устаткування для переробки пластмас у виробі стає все більш важливим інструментом для проектувальників та інженерів. Це надає доступ до такої інформації про процеси переробки полімерів, яка є ключовою в розумінні умов цих процесів і не може бути отримана іншим шляхом, крім експериментального, який також не завжди доступний. Автоматизоване моделювання також має значні переваги, коли це стосується ефективного скорочення витрат.

Традиційно, головки проектувались з наступними затратними випробуваннями й процедурами виправлення, проходячи до десяти або двадцяти таких стадій.

Основною метою реологічних розрахунків екструзійного інструменту для виготовлення профілів є досягнення рівномірного розподілу швидкостей на виході з нього. Зазвичай задаються тільки величиною поперечного перерізу на вході потоку розплаву в інструмент і поперечним перерізом екструдованого профілю. Можливості формування геометрії каналів між входом і виходом практично необмежені.

Прямий же розрахунок геометрії виявляється неможливим. Тому параметри інструменту визначаються багаторазовим підбором методом проб і помилок. Виходячи з першого ескізу каналів, профіль останніх поступово змінюють до досягнення бажаного рівня швидкостей потоку.

У випадку соекструзії декілька матеріалів об'єднують до єдиного профілю задля отримання переваги різних механічних, хімічних або матеріальних властивостей від кожного полімеру (рис. 19.1).

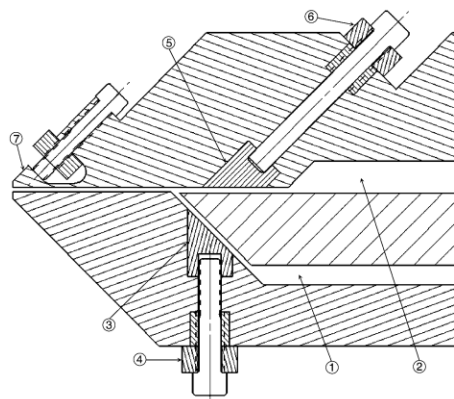


Рис. 19.1. Схема соекструзійної плоскощільної головки: 1 та 2 – канали для підведення розплаву; 3 та 5 – регулювальні планки; 4 та 6 – регулювальні болти; 7 – пружна губка

Дія головки полягає в тому, щоб конвертувати циліндричні потоки від екструдерів в бажану форму поперечного перерізу готового виробу.

На додаток до типових проблем, що відносяться до екструзії, під час соекструзії з'являються інші, специфічні труднощі. Потоки матеріалів надходять від різних впускних секцій або екструдерів з різними витратами, що може призводити до відміни в швидкостях кожного шару. Коли матеріали з різними реологічними властивостями зведені у головці в загальний потік, форма межі між двома або декількома потоками рідин уздовж складного шляху потоку змінюється. Матеріал з найвищою витратою або в'язкістю прагнучим відштовхнути інші матеріали. Розташування поверхонь розділу рідини-рідина та лінії току під час соекструзії наперед невідомі. Матеріали також по-різному реагуватимуть на теплові умови, які також можуть значно впливати на форму потоку. Все це призводить до того, що можна отримати несподівані для розробників розподіли швидкостей на виході з головки. Тому процес проектування такої головки дуже складний.

Але процес розрахунку головок може бути істотно полегшений за допомогою числових методів моделювання.

Для того, щоб у результаті зміни геометрії каналів можна було швидше і простіше передбачити об'ємні співвідношення потоків, зазвичай звертаються до розрахункової методики, що об'єднує метод скінченних елементів (МСЕ) і теорію мереж. У результаті комбінації обох розрахункових методів вдається реалізувати такі їх переваги, як точний розрахунок величин швидкості й тиску, а також відносно невеликий час розрахунку.

## **19.2. Програма COMPUPLAST**

Програма [35] заснована на скінченноелементному методі (МСЕ) математичного аналізу й надає детальну інформацію про поля течії, які утворюються в різноманітних елементах екструдера. Вона базується на тривимірному (3D) аналізі і дає змогу проаналізувати течію полімерних матеріалів в каналах складної геометрії на звичайному персональному комп'ютері.

3D модуль МСЕ було розвинено з урахуванням інженерного проектування процесу екструзії. Багато особливостей 3D модуля дозволяють користувачу виконувати детальне вивчення складного поля потоку відносно швидко та ефективно (рис. 19.2). Виробники устаткування і просунуті користувачі використовують цей модуль для розробки та аналізу нових конструкцій екструдерів і головок. Просунутий модуль, що простежує траєкторії частинок, може використовуватися для визначення потрібного початкового розподілу шарів полімерів під час соекструзії таким чином, щоб досягти правильного кінцевого розподілу. Це, наприклад, може допомогти скоротити кількість зовнішнього полімерного матеріалу, який потрібен у конфігурації співекструдованого профілю.

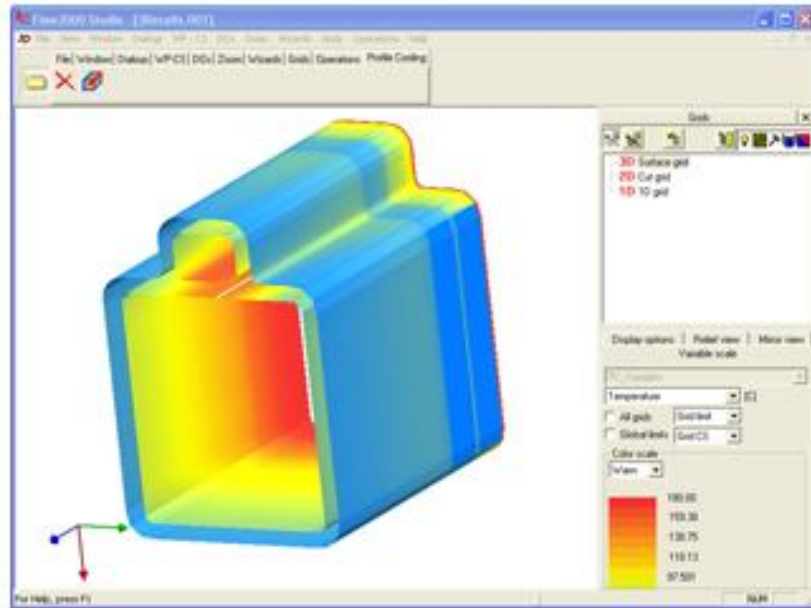


Рис. 19.2. Приклад інтерфейсу програми COMPUPLAST

3D модуль MCE забезпечує:

- вдосконалений графічний інтерфейс проекту;
- просунуте дослідження траєкторії частинки;
- анімацію потоку;
- швидкий та ефективний механізм розв'язання задач;
- збереження зображення результату;
- читає POLYCAD<sup>®</sup> 3-D файли;
- вдосконалений інтерфейс бази даних матеріалів (рис. 19.3).

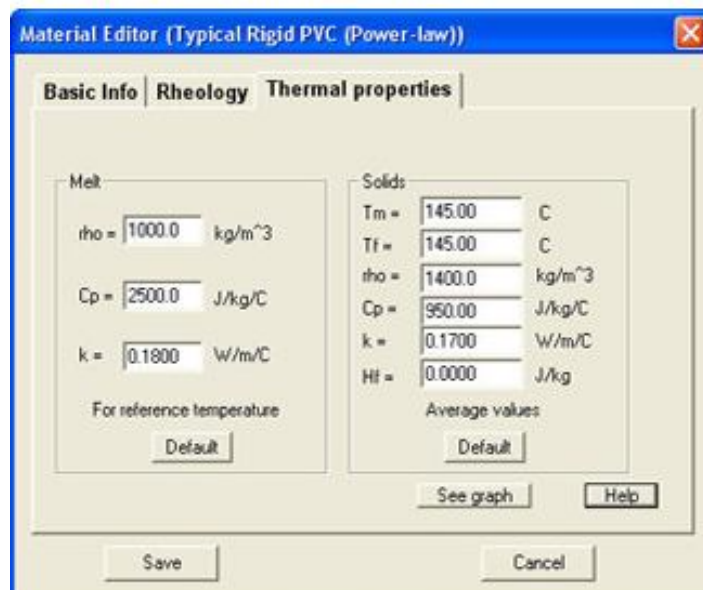


Рис. 19.3. Приклад інтерфейсу завдання властивостей матеріалу

Модуль профільних головок VEL використовується для точного аналізу та проектування секцій головок довільної форми. Програма може забезпечити детальну інформацію про потік крізь профільну головку. Падіння тиску, розподіл швидкостей та інтенсивності зсуву фрагмента зображення – тільки деякі з характеристик потоку, які можуть бути оцінені.

Модуль VEL використовується компаніями, які проектують екструзійні процеси та обладнання для розробки нових або модернізації наявних проектів. Серед його нових особливостей є можливість симулювати пристінні ефекти, які роблять програму точнішою. Цей модуль може бути використаний для визначення максимальної швидкості екструзії та оптимізації процесу (рис. 19.4).

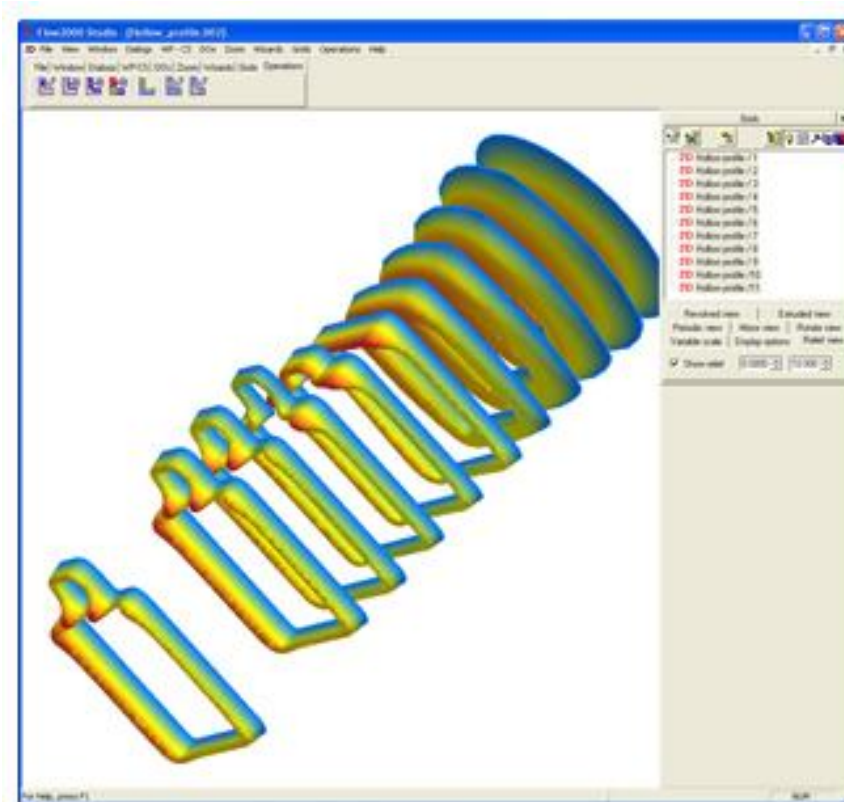


Рис. 19.4. Зображення в модулі VEL зміни профілю екструдату в головці

### 19.3. Програма Moldflow

Програмний продукт Autodesk Simulation Moldflow [36] вирішує проблеми, які виникають під час підготовки виробництва нових виробів, і є основним програмним продуктом технології Moldflow. Він надає можливість проводити аналіз течії, ущільнення та охолодження розплаву термопластичного матеріалу на стадіях уприскування, витримки під тиском і витримки на охолодження.

У Moldflow проводиться аналіз неізотермічної течії розплаву частково стиснутого полімеру в каналах літників і порожнині форми з урахуванням тепловиділення від тертя в розплаві, теплових ефектів стиснення–розширення розплаву, входових ефектів, нерівномірного й несиметричного охолодження, теплофізичних властивостей формоутворювальних деталей прес-форми та інших чинників. Аналіз уприскування може виконуватися як у режимі управління швидкістю уприскування (за постійної швидкості уприскування або за наявності відомого профілю швидкості), так і в режимі управління тиском.

Геометрична модель виробу для аналізу й сіткова область може бути одержана з таких CAD/CAE-систем, як Parasolid, Autodesk Inventor, CATIA, Pro/ENGINEER, SolidWorks та ін.

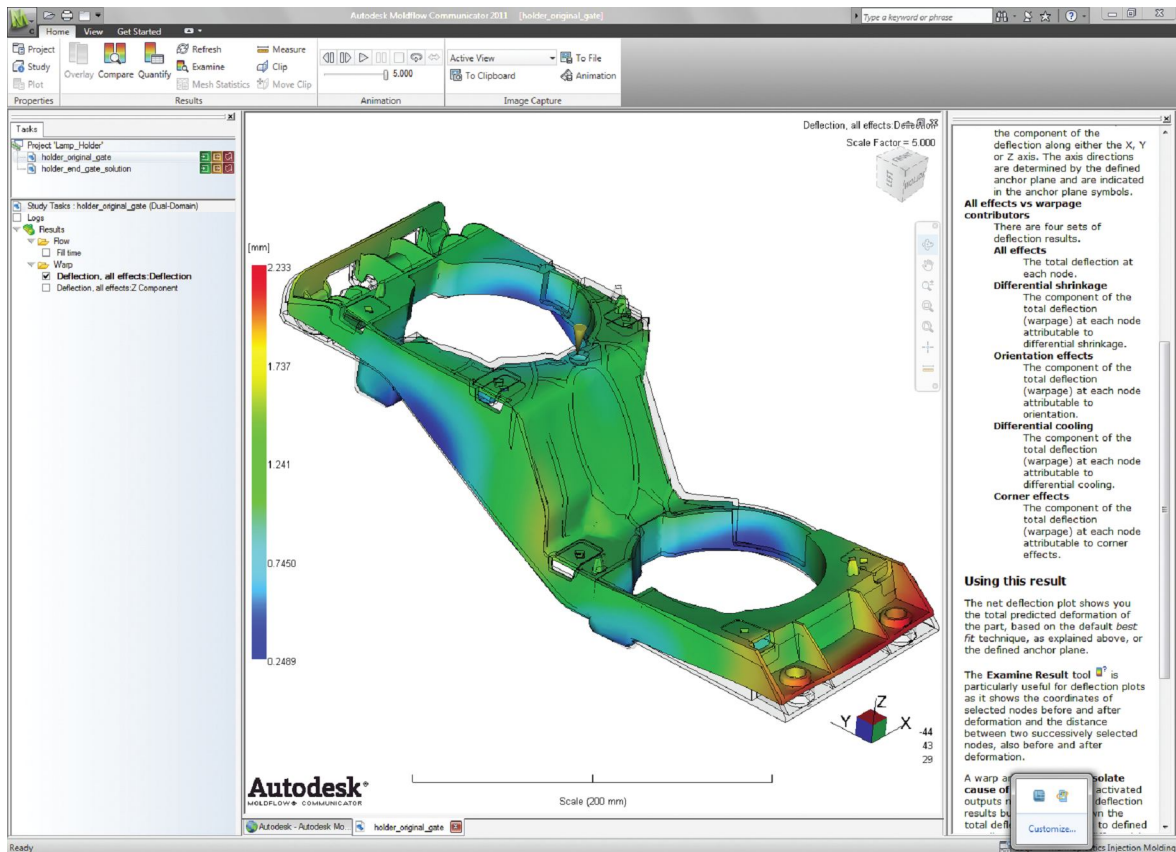
Під час аналізу уприскування користувач одержує графічний розподіл у будь-який момент часу всіх найважливіших параметрів розплаву (температури, тиску, напружень і швидкості зсуву, товщину затверділого пристінного шару, в'язкості, орієнтації матеріалу тощо), що визначають якість виробу (рис. 19.5). Програма показує положення ліній спаю й повітряних пасток, недоливів, попереджає про появу облою та інших проблем. На основі системи критеріїв робиться висновок про прийнятність конструкції та умов лиття, а також про заходи для усунення виявлених проблем.

Ряд оптимізаційних завдань програма виконує автоматично або напівавтоматично. До таких завдань відносяться: знаходження оптимальної швидкості уприскування, геометрії ливників, визначення місць впускання, балансування товщини ливників, мінімізація тиску й часу циклу, режим охолодження та ін. Для аналізу витримки під тиском і витримки на охолодження моделюються процеси об'ємної усадки та ущільнення полімеру, прогнозуються утяжини. Розрахунок параметрів процесу проводиться на основі бази властивостей матеріалів, що містяться в банку даних Moldflow або вводяться користувачем.

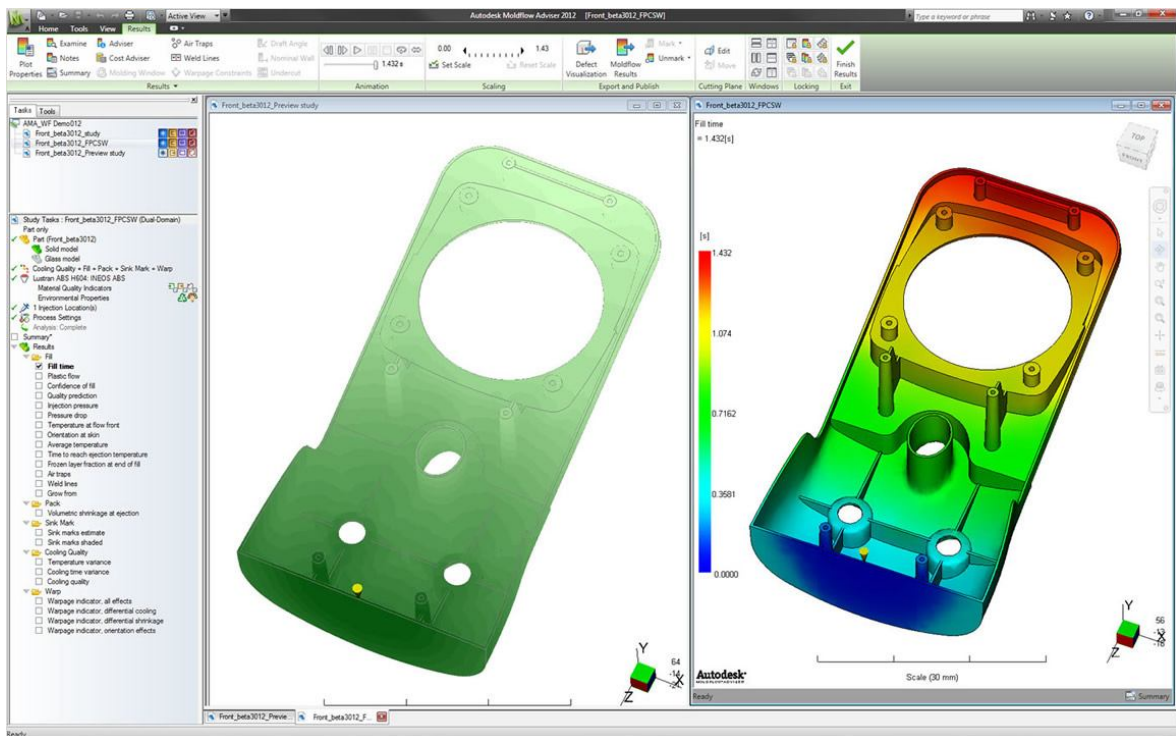
Графічний інтерфейс і пре/пост процесор, що постачаються у складі програмного продукту, містить диспетчер проектів, функції автоматичної побудови ливникової системи, перевірки й «лікування» сітки, автоматичної генерації звіту у форматі текстового редактора Word або програми PowerPoint.

#### **19.4. Програма POLYFLOW**

Програмний продукт ANSYS POLYFLOW [37] допомагає розв'язувати багато задач переробки полімерів, дозволяючи користувачеві широкий вибір варіантів: 2D або 3D геометрія, ізотермічна або неізотермічна постановка, стаціонарний (наприклад, екструзія), або нестаціонарний процес (наприклад, лиття під тиском, термоформування, роздув).



a



б

Рис. 19.5. Постпроцесор і графічне вікно аналізу Moldflow



Головна особливість програми POLYFLOW – її здатність передбачити параметри течії з утворенням тривимірних вільних поверхонь в процесі екструзії узагальнених ньютонівських і в'язкопружних рідин. Програма дозволяє змодельовати форму екструдату у вільному потоці поза головкою. Проблеми екструзії в технологічному процесі часто характеризуються складною геометрією з багатьма кутами. POLYFLOW має можливість обчислити форму фільтри головки, потрібної для отримання бажаної форми екструдату.

Багатодомений підхід використовується в POLYFLOW для моделювання передачі теплоти в областях складної конфігурації або між рідкою та твердою фазами, а також під час соекструзії або інших спільних потоків різних рідин. Моделювання можливо здійснювати для рідин, які є або узагальненими ньютонівськими, або в'язкопружними за поведінкою. Розташування поверхні розділу рідина–рідина при соекструзії апріорно невідомо. Як і в розрахунках вільних поверхонь, користувачем спочатку вибираються інтерфейси обчислення разом зі скінченноелементною сіткою.

Більшість виробничих проблем, вирішених POLYFLOW, пов'язані з надзвичайною нелінійністю, внаслідок вільних деформацій зовнішніх поверхонь або складної поведінки рідин. Через цю надзвичайно нелінійну поведінку, зазвичай неможливо досягти кінцевого значення бажаних параметрів потоку в межах єдиної ітераційної процедури. Тоді необхідно одержати рішення в цілому ряді проміжних кроків. Завдання зміни матеріальних параметрів або граничних умов оброблюється в POLYFLOW повністю автоматичною процедурою. Приріст або зменшення параметрів коригується на основі сходження ітерацій.

Розподіл швидкостей екструдату на виході з головки може виявитись далеким від прийнятного. Тертя, що виникає між частинками матеріалу та стінками головки, уповільнює швидкість розплаву до дуже малої, можливо навіть повністю. З іншого боку, в центрі великих секцій потоку, де тертя з сусідніми частинками незначне, локальна швидкість може бути великою. На виході екструдату з головки, де немає ніяких стінок і тертя уздовж межі області потоку, швидко відбувається перерозподіл швидкостей. Так, частинки, які повільно пересувалися біля стінки, матимуть прискорення до загальної швидкості вільного струменя. Так само, швидкі частинки, що рухались в середині великої секції потоку, матимуть уповільнення до середньої швидкості екструдату.

У разі звуження області потоку, швидкість частинок в цій області прискориться. Підтримуючи діючу витрату, звуження секції потоку автоматично збільшить швидкість розплаву. Так само, для того, щоб уповільнити частинки, екструдату доведеться роздутися. Для профілів складної конфігурації цей процес стає важко передбачуваним, що утруднює проектування профільних головок.



На додаток до перерозподілу швидкостей, ускладнити ситуацію може також інша поведінка розплаву. Проходячи через вузькі секції потоку, тертя стає значно вище, що призводить до більшого дисипативного нагрівання. Ця вища температура в місцевому масштабі зменшить в'язкість матеріалу, поліпшуючи його текучість. Релаксація тиску зазвичай призводить до більшої деформації. Спінювання або хімічні реакції також можуть вплинути на властивості матеріалу.

Програма дозволяє задавати такі параметри як, наприклад, робочі режими (витрата, часткове ковзання уздовж стінки, зовнішні швидкості та сили тощо) або теплові граничні умови (задана температура на поверхнях та в потоці, кількість конвективної або випромінюючої теплоти тощо). Розв'язуючи рівняння Нав'є-Стокса спільно з рівнянням енергії, POLYFLOW під час розрахунку поведінки матеріалу і конструктивних елементів головки може взяти до уваги розподіл швидкостей потоку, локальне падіння тиску, деформацію кожної секції конфігурації, температурне поле та ін.

Розглядаючи течію конкретного матеріалу крізь головку визначеної конструкції в заданих робочих режимах, можливо передбачити форму кінцевого екструдату з урахуванням деформації від перерозподілу швидкостей на виході з головки (рис. 19.6). Також можливо проаналізувати модифікації геометрії каналів головки на кінцеву форму профілю.

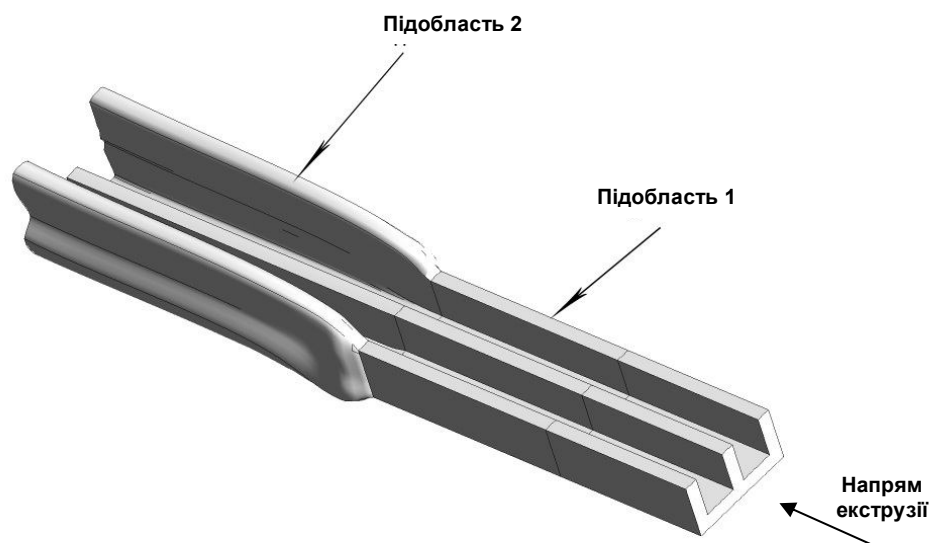


Рис. 19.6. Розрахункова модель фільери головки (підобласть 1) та зекструдованого профілю (підобласть 2)

Головна проблема, що вирішується під час проектування екструзійних головок, полягає в необхідності врахування деформації матеріалу після виходу з них. Ці деформації виникають переважно завдяки комбінованому ефекту перерозподілу швидкостей і релаксації тиску для в'язкопружних

матеріалів, що покидають головку. Оскільки межа екструдату змінює свою форму протягом моделювання, позиція вільної поверхні стає невідомою. Матеріальні потоки з метою охолодження проходять через повітря або занурюються у водну або нафтову ванну. Часто виправлення продуктів екструзії завершають додаткові операції як, наприклад, калібрування і термообробка.

Дана програма дозволяє отримувати відповідь на критичне питання для проектувальника – яку форму головки потрібно виготовити для того, щоб компенсувати деформацію екструдату на виході у вільному струмені. Використовуючи POLYFLOW, розробник конкретизує форму профілю, яку хотів би одержати і програма автоматично регулює форму каналів головки.

На рис. 19.7 показано визначену за допомогою вказаної методики форму фільтри головки для одержання ІІІ-подібного екструдату.

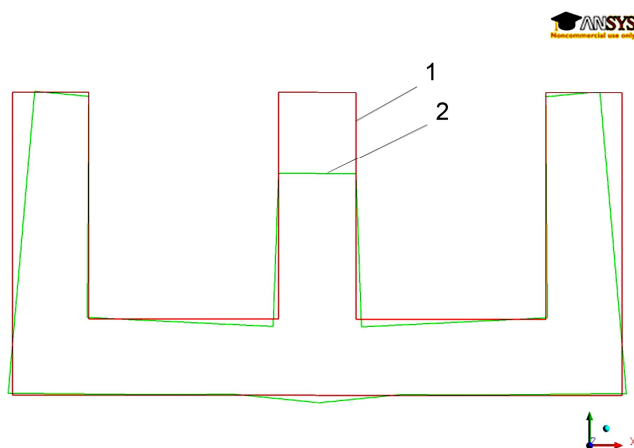


Рис. 19.7. Поперечні перерізи ІІІ-подібного екструдату (1) і фільтри оптимізованої головки (2) для його виготовлення

Можливості проектування головки можуть комбінуватися з особливостями соекструзії. У цьому разі POLYFLOW не тільки порекомендує форму каналів головки для одержання точної форми екструдату, але також вкаже позицію точного розташування різних полімерних шарів у кінцевому профілі. Це особливо важливо, коли потрібна мінімальна товщина кожного шару.

## 19.5. Програма «VESNA»

Науковцями інженерно-хімічного факультет НТУУ «КПІ» також розроблено систему автоматизованого проектування VESNA на базі універсальних залежностей суцільних середовищ та МСЕ [12, 13, 31, 34]. В основу побудови алгоритмів покладено ідею інтеграції в єдиному середовищі програмних продуктів розрахунку параметрів теплових і гідродинамічних

процесів переробки середовищ із змінними властивостями та взаємопов'язаних з ними розрахунків на міцність і жорсткість конструктивних елементів.

Як приклад використання системи VESNA на рис. 19.8 наведено розрахований розподіл в'язкості розплаву в головці для формування листових виробів.

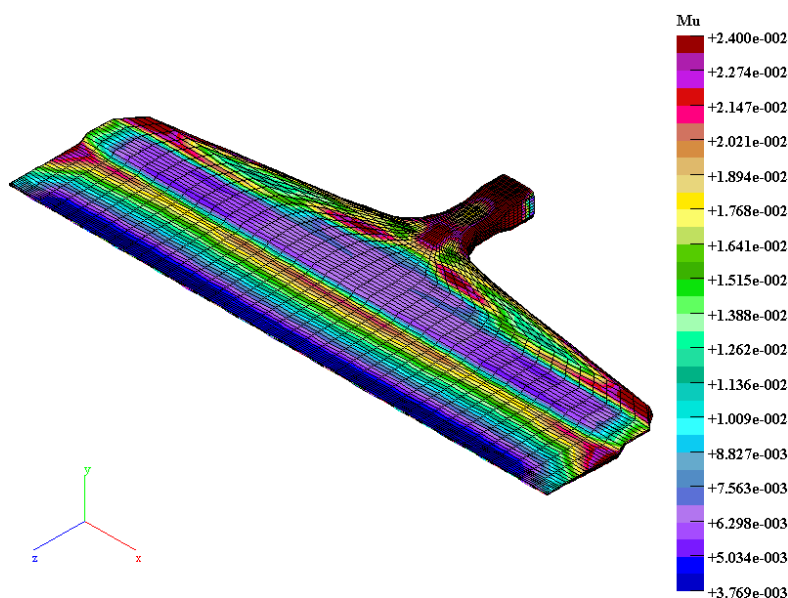
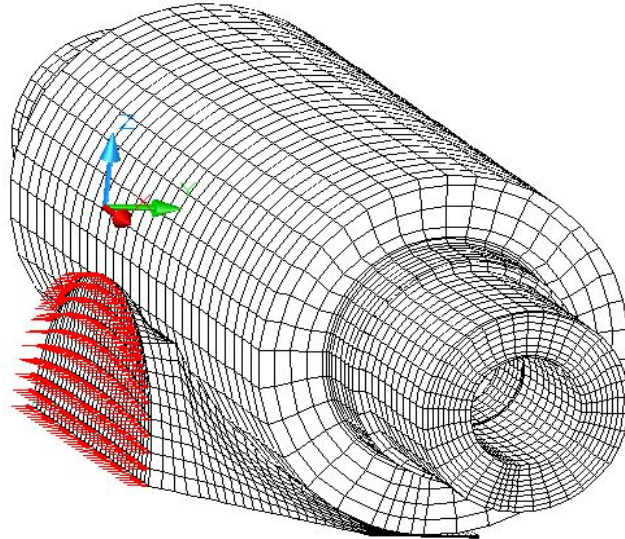


Рис. 19.8. Візуалізація в системі VESNA течії розплаву в плоскощільній головці

Система дозволяє розглядати будь-яке середовище за універсальною методикою, в тому числі для різних фазових станів та переходів між ними, наприклад, плавлення та затвердіння. В умовах формування полімерних виробів з тонкими перерізами навіть незначні деформації конструктивних елементів можуть суттєво впливати на гідродинаміку процесу, і навпаки. Тому зв'язані між собою розрахунки процесів формування виробів та деформації конструктивних елементів обладнання, на якому вони реалізуються, дозволяє точніше врахувати особливості конкретного об'єкту моделювання.

Як приклад взаємовпливу пружності конструктивних елементів формуючого устаткування та параметрів течії перероблюваних матеріалів у його каналах розглядався процес формування листа з гумової суміші в черв'ячно-валковому агрегаті (ЧВА). Просторова модель течії гумової суміші безпосередньо у формуючій зоні черв'ячно-валкового агрегату являє собою геометрично складний перехід від циліндричного каналу черв'ячної машини до міжвалкового зазору формуючої головки з валками, що обертаються. На рис. 19.9 показано скінченноелементну розрахункову схему верхньої половини формуючої головки, симетричної відносно горизонтальної площини, що проходить крізь середину міжвалкового зазору.



*Рис. 19.9. Скінченноелементна розрахункова схема формуючої головки ЧВА*

Під час числового моделювання є можливість досліджувати просторові поля розподілу тиску в формуючій зоні, швидкостей течії перероблюваного матеріалу з урахуванням зміни його реологічних властивостей для різних технологічних режимів у взаємозалежності з прогином валків. Конфігурація перехідної формуючої зони ЧВА відрізняється від інших валкових машин, тому якісна картина процесу формування та прогину валків в ньому відрізняється від таких для каландрування й вальцювання, що говорить про обґрунтованість застосування для подібних об'єктів лише тривимірних моделей. Наведений приклад відображає можливості розробленої математичної моделі здійснення зв'язаного рішення пружної, теплової та нелінійно-в'язкої задач.

## ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Наведіть класифікацію формуючого інструменту.
2. Вкажіть конструктивні особливості систем виштовхування форм для лиття під тиском.
3. Вкажіть фактори, які потрібно враховувати під час проектування формуючого інструменту.
4. Вкажіть конструктивні особливості центральних ливникових каналів.
5. Вкажіть вимоги до технологічності виробів з пластмас.
6. Вкажіть конструктивні особливості впускних ливникових каналів.
7. Наведіть класифікацію та вкажіть конструктивні особливості пресформ.
8. Вкажіть конструктивні особливості розвідних ливникових каналів.
9. Вкажіть конструктивні особливості матриць і пуансонів пресформ.
10. Наведіть класифікацію гарячеканальних форм. Обґрунтуйте їх переваги та недоліки.
11. Вкажіть конструктивні особливості гладких формуючих знаків.
12. Вкажіть конструктивні особливості ГКС із зовнішнім обігрівом.
13. Вкажіть конструктивні особливості різьбових формуючих знаків.
14. Вкажіть конструктивні особливості теплоізованих ГКС.
15. Вкажіть застосування та різновиди інформаційних знаків.
16. Вкажіть конструктивні особливості сопел ГКС із зовнішнім нагрівом.
17. Вкажіть конструктивні особливості формуючих гнізд для пресформ.
18. Вкажіть конструктивні особливості сопел ГКС, що закриваються.
19. Вкажіть конструктивні особливості систем виштовхування пресформ.
20. Вкажіть конструктивні особливості формуючих деталей форм для лиття під тиском.
21. Вкажіть конструктивні особливості систем бокового переміщення у формах.
22. Вкажіть конструктивні особливості вентиляційних каналів у формах для лиття під тиском.
23. Вкажіть конструктивні особливості систем кріплення у формах.
24. Вкажіть конструктивні особливості систем термостатування форм для лиття під тиском.
25. Вкажіть конструктивні особливості систем центрування у формах.
26. Вкажіть конструктивні особливості тунельних ливникових систем.
27. Вкажіть конструктивні особливості систем обігріву пресформ.
28. Наведіть основні принципи конструювання форм для лиття під тиском.
29. Вкажіть вихідні дані для конструювання форм для лиття під тиском.
30. Вкажіть конструктивні особливості точкових ливникових систем.

31. Наведіть класифікацію екструзійних головок.
32. Вкажіть конструктивні особливості та технологічні режими методу пневмоформування.
33. Перелічіть та охарактеризуйте фактори, які потрібно враховувати під час проектування екструзійних головок.
34. Вкажіть конструктивні особливості та технологічні режими методу вакуумформування.
35. Наведіть класифікацію та особливості методів пневмовакуумформування.
36. Перелічіть та охарактеризуйте основні принципи конструювання екструзійних головок.
37. Вкажіть конструктивні особливості головок для виробництва труб.
38. Вкажіть конструктивні особливості прямоточних гранулювальних головок.
39. Вкажіть конструктивні особливості вентиляційних систем форм для роздувного формування.
40. Вкажіть особливості методів холодної та гарячої грануляції.
41. Вкажіть конструктивні особливості форм для роздувного формування.
42. Перелічіть та охарактеризуйте конструктивні засоби запобігання утворенню ліній зварювання.
43. Наведіть класифікацію калібрувального інструменту.
44. Вкажіть конструктивні особливості калібрувального інструменту.
45. Вкажіть принципи розрахунку калібрувального інструменту.
46. Вкажіть принципи наближеного гідравлічного розрахунку екструзійних головок.
47. Вкажіть принципи уточненого гідравлічного розрахунку екструзійних головок.
48. Вкажіть конструктивні особливості профільних головок.
49. Вкажіть конструктивні особливості головок для роздуву трубних заготовок.
50. Вкажіть конструктивні особливості трикутних плоскощілинних головок.
51. Вкажіть конструктивні особливості головок для виробництва кабелю.
52. Вкажіть конструктивні особливості колекторних плоскощілинних головок.
53. Вкажіть конструктивні особливості кутових плівкових головок.
54. Вкажіть принципи розрахунку колекторних плоскощілинних головок.
55. Перелічіть та охарактеризуйте засоби балансування потоку в плоскощілинних головках.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. *Мирзоев Р. Г.* Основы конструирования и расчета деталей из пластмасс и технологической оснастки для их изготовления / Р. Г. Мирзоев. – М. : Машиностроение, 1972. – 416 с.
2. *Альшиц И. П.* Проектирование деталей из пластмасс. – М. : Машиностроение, 1969. – 215 с.
3. *Пантелеев А. П.* Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс / А. П. Пантелеев, Ю. М. Шевцов, И. А. Горячев. – М. : Машиностроение, 1986. – 400 с.
4. *Демин Е. Н.* Справочник по прессформам / Е. Н. Демин. – Л. : Лениздат, 1967. – 368 с.
5. *Басов Н. И.* Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов / Н. И. Басов. – М. : Химия, 1991. – 352 с.
6. *Видгоф Н. Б.* Основы конструирования литьевых форм для термопластов / Н. Б. Видгоф. – М. : Машиностроение, 1979. – 264 с.
7. *Методические указания к проведению лабораторных работ и УИРС по курсу «Пресс-формы для полимеров»* / уклад. Г. А. Насонкин, В. П. Соломин – К. : КПИ, 1993. – 19 с.
8. *Основы проектирования и расчета литьевого и прессового оборудования для переработки полимерных материалов* / А. С. Клинков, О. Г. Маликов, В. И. Кочетов, Н. П. Жуков. – Тамбов : Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 1999. – 162 с.
9. *Каплун Я. Б.* Формующее оборудование экструдеров / Я. Б. Каплун, В. С. Ким. – М. : Машиностроение, 1967. – 159 с.
10. *Ким В. С.* Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким. – М. : Химия, – 2005. – 568 с.
11. *Производство изделий из полимерных материалов : учеб. пособие* / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко. – СПб. : Профессия, 2004. – 464 с.
12. *Моделювання оснастки для формування полімерних виробів* / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, О. С. Сахаров, В. Ю. Щербина. – К. : НТУУ «КПІ», 2006. – 131 с.
13. *Сівецький В. І.* Комп'ютерне моделювання та проектування екструзійного полімерного устаткування / В. І. Сівецький, Д. Е. Сідоров, О. Л. Сокольський. – К. : НТУУ «КПІ», 2006. – 174 с.
14. *Ким В. С.* Исследование плоскощелевых экструзионных головок равного сопротивления и анизотропии механических свойств листов из термопластов : автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.02.01 «Материаловедение» / В. С. Ким. – М., 1965. – 20 с.

15. *Освальд Т.* Литье пластмасс под давлением : пер. с англ. / Т. Освальд, Л.-Ш. Тунг, П. Дж. Герман. – СПб: Профессия, – 2006. – 712 с.
16. *Основы* технологии переработки пластмасс : учебник для вузов / [С. В. Власов, Э. Л. Калинин, Л. Б. Кандырин и др.] ; под ред. В. Н. Кулезнёва и В. К. Гусева. – М. : Химия, 2004. – 596 с.
17. *Жданов Ю. А.* К вопросу универсальности каналов плоскощелевых головок равного сопротивления / Ю. А. Жданов, Д. Д. Рябинин, П. К. Допира // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. – К. : Техніка, 1973. – Вып. 18. – С. 7–12.
18. *Раувендааль К.* Выявление и устранение проблем в экструзии / К. Раувендааль, М. д. Пилар Норьета Е., Х. Харрис ; пер. с англ. под ред. В. П. Володина. – СПб. : Профессия, 2008. – 328 с.
19. *Рябинин Д. Д.* К расчету профиля подводящего канала плоскощелевых головок / Д. Д. Рябинин, Ю. Н. Самсоненко, С. Ю. Шевчишен // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. – К. : Техніка, 1977. – Вып. 25. – С. 21–25.
20. *Особенности* моделирования коллектора плоскощелевой головки для изготовления пленок большой ширины / Р. З. Бакиров, В. А. Сенатос, С. Н. Михайлов, М. Л. Фридман. // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. – К. : Техніка, 1990. – Вып. 51. – С. 36–39.
21. *Лукач Ю. Е.* Оборудование для производства полимерных пленок / Ю. Е. Лукач, А. Д. Петухов, В. А. Сенатос. – М. : Машиностроение, 1981. – 224 с.
22. *Yelmy H.* Aspects of the design of coathanger die for cast film and sheet applications // Adv. Polim. Eng. – 1987, №7 – P.12–16.
23. *Michaeli W.* Simulation verbessert Qualitat beim Pulvermetall-Spritzgießen / W. Michaeli, J. Knothe, M. Hemmer // Maschinenmarkt. – 1995. – Bd 101, N 37. – S. 44–47.
24. *Michaeli W.* Extrusion dies for plastics and rubber: design and engineering computations / W. Michaeli. – New York: Carl Hanser Verlag, 1992. – 340 p.
25. *Wu Ping-Yao.* A simple model for heat transfer inside an extrusion die / Ping-Yao Wu, Lee-May Huang, Ta-Jo Liu // Polym. Eng. and Sci. – 1995. – Vol. 35, N 21. – P. 1781–1784.
26. *Chang Yun-Han.* Experimental observation on entrance flow inside extrusion dies // Yun-Han Chang, Shu-Heng Wen, Ta-Jo Liu // Polym. Eng. and Sci. – 1996. – Vol. 36, N 21. – P. 2663–2675.
27. *Yuan Sinh-Lun.* A flow model for non-Newtonian liquids inside a slot die / Sinh-Lun Yuan // Polym. Eng. and Sci. – 1995. – Vol. 35, N 7. – P. 577–586.
28. *Zhao J.* Simulation of the rheological behavior of polymer blends by finite element analysis / J. Zhao, L. Mascia, V. Nassehi // Adv. Polym. Technol. –



1997. – Vol. 16, N 3. – P. 206–226.

29. *Sander R.* Slit die extrusion from a thermal and mechanical perspective / R. Sander, J. Pittmann // *Kautschuk Gummi Kunststoffe*. – Bd 48. – N 1, 1995. – S. 17–21.

30. *Течение вязкой жидкости между дорном и матрицей кабельной головки* / В. С. Кривошеев, И. Г. Решетник, Ю. С. Зотов и др. // *Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб.* – К. : Техніка, 1974. – Вып. 20. – С. 128–133.

31. *Двойнос Я. Г.* Процессы переработки композиционных материалов экструзионным способом : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.13 «Машины и аппараты химических производств» / Двойнос Ярослав Григорьевич. – К., 1999. – 193 с.

32. *Сокольський О. Л.* Розроблення плоскощільних головок для екструзійного формування листових та плівкових виробів із полімерних композицій : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.13 «Машины и аппараты химических производств» / Сокольський Олександр Леонідович. – К., 2005. – 174 с.

33. *Синюк О. М.* Удосконалення прес-форм для лиття деталей взуття : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.10 «Машины легкой промышленности» / О. М. Синюк. – К., 2002. – 20 с.

34. *Обладнання для переробки композиційних матеріалів методом лиття під тиском : метод. вказівки до виконання лабораторних робіт* / уклад. В. І. Сівецький, Д. Е. Сідоров, О. Л. Сокольський та ін. – К. : ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2003. – 44 с.

35. *Сокольський О. Л.* Моделювання процесу протікання неньютонівської рідини через канал з кільцевим поперечним перетином, що звужується / О. Л. Сокольський, К. С. Погодаєв // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2006. – № 3/2. – С. 125–128.

36. *Polymer Processing Simulation Specialists* [Electronic resource]. – Last access : 30.10.2013. – Mode of access : <http://www.compuplast.com>.

37. *Продукты Autodesk Simulation Moldflow* [Електронний ресурс]. – Дата доступу : 30.10.2013 р. – Режим доступу : <http://www.autodesk.ru/adsk/servlet/pc/index?siteID=871736&id=14659053>.

38. *ANSYS Polyflow* [Electronic resource]. – Last access : 30.10.2013. – Mode of access : <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Specialized+Products/ANSYS+Polyflow>.

## ЗМІСТ

Вступ .....	3
Основні позначення та скорочення .....	5
1. Класифікація і методологічні основи проектування формуючого інструменту .....	6
1.1. Загальні положення .....	6
1.2. Основні чинники, що визначають технологічність виробів із пластмас .....	7
2. Класифікація, конструктивні особливості і принцип дії форм для пресування .....	9
2.1. Загальні положення .....	9
2.2. Основна класифікація форм для пресування .....	9
3. Конструювання формуючих елементів форм .....	14
3.1. Загальні положення .....	14
3.2. Розрахунок виконавчих розмірів формуючих елементів форм .....	15
3.3. Формуючі знаки .....	17
3.4. Різьбові знаки .....	18
3.5. Формуючі гнізда .....	21
3.6. Розрахунок висоти порожнини завантажувальної камери .....	22
3.7. Розрахунок зусиль пресування та знімання .....	23
4. Системи виштовхування, переміщення і кріплення .....	24
4.1. Загальні положення .....	24
4.2. Розрахунок виштовхувачів на стійкість .....	26
4.3. Конструктивне виконання систем бокового переміщення деталей форми .....	27
5. Системи обігріву прес-форм .....	30
5.1. Загальні положення .....	30
5.2. Розрахунок потужності нагрівників у пусковому режимі роботи форми .....	30
5.3. Розрахунок потужності нагрівників у стаціонарному режимі роботи форми .....	31
6. Особливості конструкції і принцип дії форм для лиття під тиском .....	33
6.1. Загальні положення .....	33
6.2. Якість обробки і точність виготовлення деталей прес-форм .....	39
6.3. Розрахунок робочих розмірів формуючих елементів форм .....	41
6.4. Розрахунок виконавчих розмірів охоплювальних елементів форм .....	41
6.5. Розрахунок виконавчих розмірів охоплюваних елементів форм .....	42
7. Ливникові системи .....	43
7.1. Загальні положення .....	43
7.2. Впускні ливникові канали .....	45
7.3. Типи ливникових систем .....	47
7.4. Вентиляційні канали .....	51
8. Гарячоканальні форми .....	52
8.1. Загальні положення .....	52
8.2. Колектори і сопла із зовнішнім нагріванням .....	55
8.3. Ізольовані колектори і сопла .....	55
8.4. Колектори із внутрішнім нагріванням .....	56
8.5. Сопла ГКС .....	58
9. Конструювання формуючих деталей і систем термостатування .....	63
9.1. Загальні положення .....	63
9.2. Системи термостатування форм для лиття під тиском .....	65
9.3. Розрахунок системи термостатування литтєвих форм .....	68

10. Дефекти литтєвих виробів і способи їх усунення .....	70
10.1. Недолив, неповне впорскування .....	70
10.2. Облой .....	71
10.3. Видима лінія спаю .....	72
10.4. Повітряна пастка, замикання повітря .....	72
10.5. Темні включення, підгари повітря .....	73
10.6. Струминне заповнення .....	74
10.7. Сріблясті лінії або розводи на поверхні .....	74
10.8. Ефект «мармуру» .....	75
10.9. Газові бульбашки .....	75
10.10. Газові бульбашки .....	76
10.11. Утяжини (утяжки), внутрішні усадкові порожнини .....	76
10.12. Викривлення .....	77
10.13. Розтріскування .....	78
11. Основні принципи конструювання екструзійних головок .....	79
11.1. Класифікація екструзійних головок .....	79
11.2. Чинники, що враховуються під час конструювання головок .....	80
11.3. Основні конструктивні особливості екструзійних головок .....	81
11.4. Гідрравлічний розрахунок головок .....	82
12. Прямотечійні кільцеві і профільні головки .....	85
12.1. Прямотечійні кільцеві головки .....	85
12.2. Профільні головки .....	91
13. Плоскощілинні головки .....	94
14. Кутові кільцеві головки .....	100
15. Дефекти екструдованих виробів і способи їх усунення .....	106
15.1. Усунення причин нестабільності процесу екструзії .....	106
15.2. Порожнини у виробах .....	108
15.3. Проблеми гелеутворення .....	110
15.4. Нарости матеріалу біля виходу з головки .....	110
15.5. V-або W-подібні лінії .....	112
15.6. Сторонні вкраплення і зміна кольору .....	112
15.7. Зварні шви .....	112
16. Калібрувальний інструмент .....	114
16.1. Класифікація калібрувальних пристроїв .....	114
16.2. Розрахунок калібрувального пристрою .....	118
17. Форми для роздувного формування .....	121
18. Інструмент для пневмо- та вакуумформування .....	125
19. Моделювання процесів течії розплавів полімерів у формуючому устаткуванні .....	129
19.1. Загальні положення .....	129
19.2. Програма COMPUPLAST .....	130
19.3. Програма Moldflow .....	132
19.4. Програма POLYFLOW .....	133
19.5. Програма «VESNA» .....	137
Запитання для самоконтролю .....	140
Список рекомендованих джерел інформації .....	142

[illegible]

Навчальне видання

**Сокольський** Олександр Леонідович

**Сівецький** Володимир Іванович

**Мікульонок** Ігор Олегович

# **ПРОЕКТУВАННЯ ФОРМУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТМАС**

Навчальний посібник

В авторській редакції